



TESIS - TE142599

# **MEMAKSIMALKAN DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK SEL SURYA YANG TERTUTUP BAYANGAN MENGGUNAKAN RANGKAIAN MATRIKS SAKLAR BERBASIS LOGIKA FUZZY DAN REGULATOR TEGANGAN BERBASIS KONTROLER PID**

BASILIO MENDONÇA FREITAS  
07111550028001

DOSEN PEMBIMBING  
Dr.Ir. MOCHAMMAD RAMELI  
Ir. RUSDHIANTO EAK, MT

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



TESIS – TE142599

# MEMAKSIMALKAN DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK SEL SURYA YANG TERTUTUP BAYANGAN MENGGUNAKAN RANGKAIAN MATRIKS SAKLAR BERBASIS LOGIKA *FUZZY* DAN *REGULATOR* TEGANGAN BERBASIS KONTROLER PID

Basilio Mendonça Freitas  
07111550028001

DOSEN PEMBIMBING  
Dr.Ir. Mochammad Rameli  
Ir. Rusdhianto EAK, MT

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LEMBAR PENGESAHAN

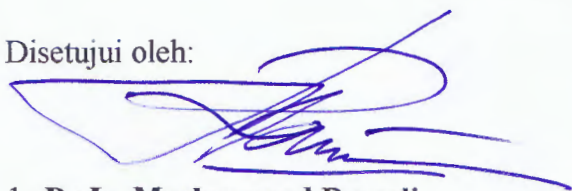
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Basilio Mendonça Freitas  
07111550028001

Tanggal Ujian : 21 Desember 2017  
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:

- 
1. **Dr.Ir. Mochammad Rameli.** (Pembimbing I)  
NIP. 1954 1227 1981 031002
  2. **Ir. Rusdhianto EAK, MT.** (Pembimbing II)  
NIP. 1957 0424 1985 021001
  3. **Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA** (Penguji)  
NIP: 1959 0617 1984 031002
  4. **Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.** (Penguji)  
NIP: 1959 0219 1986 1010 01
  5. **Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.** (Penguji)  
NIP: 1968 0812 1994 032001



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

**Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.**

NIP. 197002121995121001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“MEMAKSIMALKAN DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK SEL SURYA YANG TERTUTUP BAYANGAN MENGGUNAKAN RANGKAIAN MATRIKS SAKLAR BERBASIS LOGIKA *FUZZY* DAN *REGULATOR* TEGANGAN BERBASIS KONTROLER PID**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Desember 2017

Basilio Mendonça Freitas

NRP.07111550028001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“MEMAKSIMALKAN DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK SEL SURYA YANG TERTUTUP BAYANGAN MENGGUNAKAN RANGKAIAN MATRIKS SAKLAR BERBASIS LOGIKA FUZZY DAN REGULATOR TEGANGAN BERBASIS KONTROLER PID”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Desember 2017



Basilio Mendonça Freitas

NRP.07111550028001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# MEMAKSIMALKAN DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK SEL SURYA YANG TERTUTUP BAYANGAN MENGGUNAKAN RANGKAIAN MATRIKS SAKLAR BERBASIS LOGIKA *FUZZY* DAN *REGULATOR* TEGANGAN BERBASIS KONTROLER PID

Nama mahasiswa : Basilio Mendonça Freitas  
NRP : 07111550028001  
Pembimbing : 1. Dr.Ir. Mochammad Rameli  
2. Ir. Rusdhianto EAK, MT.

## ABSTRAK

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, pada umumnya metode yang digunakan untuk memaksimalkan daya keluaran dari *photovoltaic* (PV) adalah dengan menggunakan mekanisme *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Pada kasus PV *string* yang sebagian modulnya tertutup bayangan (*shading*) yang bervariasi, maka sistem kontrol berbasis MPPT ini tidak dapat bekerja dengan baik. Hal itu diakibatkan efek *shading* yang bervariasi, sehingga daya PV Farm yang dihasilkan tidak optimal.

Penelitian ini menawarkan suatu metode alternatif untuk mengoptimasi daya PV Farm berbasis cluster tegangan string PV. Dimana kapasitas daya terpasang pada penelitian ini adalah 12000 Wp, terdiri dari 4 string PV dan setiap stringnya terdiri dari 12 Modul, sehingga total modul PV yang digunakan sebanyak 48 modul PV. Modul-modul PV yang terdapat pada string PV dihubungkan secara seri. Dimana akibat variasi efek *shading* maka besar tegangan antar string PV berpotensi berbeda. Perbedaan tersebut mengakibatkan kesulitan dalam hal disain Mekanisme *Maximum Power Point Trucking* (MPPT). Untuk itu diusulkan suatu metode pengelompokan besar tegangan yang bersesuaian dari setiap keluaran hasil mekanisme MPPT, dimana setiap keluaran MPPT terhubung secara paralel pada rangkaian matrik saklar. Rangkaian matriks saklar dikontrol menggunakan mekanisme algoritma *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Selanjutnya masing-masing hasil pengelompokan dihubungkan ke suatu rangkaian regulator berbasis kontroler *Proportional - Integral-Derivatif* (PID *controller*) yang berfungsi mengontrol besar tegangan setiap kelompok menjadi sama sesuai *setpoint* yang diinginkan.

Berdasarkan pengujian Pembangkit PV Array menggunakan metode cluster untuk kasus tertutup bayangan sebagian terjadi peningkatan daya yang sangat signifikan bahkan sampai dengan 108%, jika dibandingkan pembangkit PV Array dengan menggunakan metode konvensional (tanpa cluster). Namun hal tersebut dapat bervariasi mengikuti dinamika bayangan yang menutupi modul-modul PV yang terdapat pada pembangkit PV Array. Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa metode yang diusulkan dapat bekerja dengan baik untuk meningkatkan daya PV Array pada kondisi normal maupun tertutup bayangan sebagian.

*Kata kunci: PV, MPPT, FL, dan PID Controller.*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **OPTIMIZATION POWER SYSTEM OF PHOTOVOLTAIC UNDER SHADING USING MATRIC SWITCH REGULATOR VOLTAGE BASED FUZZY LOGIC AND PID CONTROLLER**

By : Basilio Mendonça Freitas  
Student Identity Number : 07111550028001  
Supervisor(s) : 1. Dr. Ir. Mochammad. Rameli  
2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT

## **ABSTRACT**

Based on previous studies, the method used to maximize the output power of photovoltaic (PV) is by using Maximum Power Point Tracking (MPPT) mechanism. In the case of PV strings that some of the modules are covered with varying shading, the MPPT-based control system can not work properly. This is due to the effects of shading vary, so the PV Farm power generated is not optimal.

This research offers an alternative method to optimize PV Arrayr based cluster of PV string. Where the power capacity installed in this research is 12000 Wp, consisting of 4 string of PV and each string consist of 12 Modules, so total of PV module used is 48 PV modules. The PV modules contained in the PV strings are connected in series. Where due to variations of shading effect, the voltage between the PV strings is potentially different. This difference leads to difficulties in designing the Maximum Power Point Tracking Mechanism (MPPT). this researc propose a method of grouping the corresponding voltage according to each output of the MPPT mechanism, in which each MPPT output is connected in parallel to the switch matrix circuit. The logic of this switch matrix circuit is generated using fuzzy logic inference mechanism. Furthermore, each grouping result is connected to a regulator circuit based on Proportional - Integral - Derivative (PID) controller to control the voltage of each group to be the same according to the desired setpoint.

The voltage output of this proposed system will be compared with the voltage output of system with MPPT optimization method. Based on PV PV array testing using cluster method for closed partial shadow case, there is a very significant increase of power even up to 108%, when compared to PV Array plant using conventional method (without cluster). However, it may vary according to the shadow dynamics that cover the PV modules contained in the PV array generator. So with the explanation can be concluded that the proposed method can work well to increase the power of PV Array in normal conditions as well as tertup partial shadow.

*Keywords: Pv, MPPT, FL, dan PID controller.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, pada akhirnya tesis ini telah selesai dibuat. Pada dasarnya, tesis ini tidak terlalu rumit untuk dikerjakan dan akan menjadi jauh lebih mudah karena dikerjakan dengan ikhlas. Dengan diselesaikannya tesis ini, maka salah satu syarat kelulusan Program Magister Bidang Keahlian Teknik Sistem Pengaturan Fakultas Teknik Elektro telah terpenuhi, semoga syarat-syarat yang lainnya juga dapat dengan mudah diselesaikan.

Penulis juga mengucapkan banyak terimakasih terhadap para pembimbing yang selalu mencerahkan dan dengan penuh keikhlasan senantiasa mengarahkan penulis untuk dapat segera menyelesaikan tesis ini. Ucapan terimakasih juga penulis berikan secara khusus kepada Istri tercinta dan putra putri yang selalu menemani dalam doa dan juga Bapak (Almarhum) dan ibu yang tak pernah berhenti memberi semangat, serta kepada satu pembimbing dari jurusan tetangga yang cukup bijak memberikan arahan, juga tak ketinggalan teman-teman Pasca Sarjana SP yang tak bosan menjawab segala pertanyaan. Untuk semua pihak yang telah membantu, semoga senantiasa diberikan kelancaran bagi setiap urusanya.

Penulis juga berharap, semoga tesis ini dapat bermanfaat dan dapat memperkaya kajian terkait bidang penelitian tenaga terbarukan yang saat ini sedang dan telah banyak berkembang.

Surabaya, 4, Desember, 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penulis dalam menyelesaikan Penelitian ini. penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tri Tunggal Maha Kudus penulis menyelesaikan Proyek Akhir ini.
2. Ibu Helena Mendonça dan Bapak Antão Freitas (almarhum), kasih sayang dan doa yang tidak terbatas.
3. Istri tercinta Filomena Augusta, putra jimmy, Amarin dan Putri Nelcia, Cremesia, Rafaella, kakak Agusthina, Zulimira, Hermenegilda dan Adik Flaviano, kasih sayang dan doa yang tidak terbatas.
4. Prof Joni Hermana selaku rektor Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Prof Djahuar Manfaat selaku direktur Pascasarjana Insitut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Bapak Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Elektro.
6. Ibu Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. selaku koordinator Bidang Keahlian dan dosen wali,
7. Bapak Dr.Ir. Mochammad Rameli dan Bapak Ir. Rusdhianto EAK, MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasihat, dorongan, motivasi dan arahan terhadap penyelesaian penelitian ini.
8. Bapak Prof. Ir. Abdullah Alkaff, M. Sc. Ph. D, Bapak Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA dan Bapak Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie M. Eng. Selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan bimbingan, nasihat, dorongan, motivasi dan arahan terhadap penyelesaian penelitian ini.
9. Bapak Antonius Rajagukguk, Bapak David, bapak Hendra, Bapak Eka, selaku pembimbing bayangan, inspirator sekaligus partner diskusi yang banyak mengajari ilmu dan kebijaksanaan.
10. Bapak Prof Dr. Lucas da Costa, SE. MSi. selaku Rektor Universidade da Paz beserta staf dan karyawan yang telah membimbing dan memberi motivasi berupa moril dan materil pada penulis.
11. Bapak Lourenço da Silva Gusmão selaku Direktor CNFP Becora (SENAI Becora) beserta staf dan karyawan yang telah membimbing dan memberi motivasi berupa moril dan materil pada penulis.
12. Bapak–Bapak dan Ibu-Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro, beserta Staf Karyawan, yang telah banyak membimbing dan memberi banyak ilmu pengetahuan pada penulis.
13. Mas Hendi, mbak Nurul, mas Noven, mas yossy, mas Angga, mas andika, mbak Mey, mbak Farrida, mbak Churnia, mbak Iim, mbak feby, mas Kresna, mas Ilmi, mas Albert, mas Arga, mas Sept, mas Khoiron, mas Arya, mas yoan,

mas rizal, mas maskhur, mas Aceng terima kasih sudah menjadi sahabat terbaik penulis selama ini, menjadi tempat penulis menyalurkan segala keluhan. Terima kasih untuk segala kebaikan, kebahagiaan dan ketenteraman yang tidak mungkin bisa penulis balas.

14. Semua saudara-saudaraku, di Dili, Baucau, Baguia, Osso-Huna, Osso-Sama, Watumaubere, Daraloi, Karaumate, Delfin, Miggi, Americo, Laurentino, Gustavo, matebian Antao, Alfredo (doome). Caicasa, cpitan loidoe, irmaun Lourenco, Mario Jacinto, Jacinta Edimau, Maucito I matebian osso-sama Tomak. Imi nia graca no salvasaun lahaluhan gradese wain.
15. Tiu Nocolobo Tia Noikoo, Tiu Lindo, Tia Loni, ama Dian Matebian Avo Felix, Avo nanda, Tiu Cesar, tiu Pinto, Avo Ruique, I matebian darloi Tomak. Imi nia graca no salvasaun lahaluhan gradese wain.
16. Adik Junior kilik waigae siafa (susar), Xisco, Tinufoko, apau metan, eky, tomas danabere, nety, buicinha, maun Deo, abel breok, akay, maunBoy, malcom, aje, fitun, Gido, terima kasih untuk hal-hal baik yang engkau hadirkan dan untuk semua anugerah kebaikan dan keberkahan yang ada pada dirimu, semoga Allah bisa membalas semua kebaikanmu untukku.
17. Kaka Salus. Kaka Mica, Kaka Apau, terima kasih untuk hal-hal baik yang engkau hadirkan dan untuk semua anugerah kebaikan dan keberkahan yang ada pada dirimu, semoga Allah bisa membalas semua kebaikanmu untukku.
18. Penghuni dan rekan perjuangan Lab B106, B202, AJ103 dan AJ203 , terima kasih banyak untuk kehadiran dan dukungan moral kepada penulis, semoga Allah selalu melimpahkan kasih sayang, kesehatan yang berkah dan kemurahan rezeki pada kita semua.
19. Sahabat – sahabat sarjana maupun pascasarjana Elektro 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 dan semua yang ada di lembar presensi yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
20. Keluarga besar kontrakan rodah sekolahan no.22, Mr. Abel, Mr. Raimudo, Mr. Belo Mr. Jose, Mr. Pinto, Mr. Amaro, Mr. Alfredo, Mr. Zero, Mr. Lucio, Mr. Calis, Ms. Ninha, Mr. Nando, Mr. Edio, mbak Rizqi, mbak Dilla, mbak Lissa, mas Asis, mas Dedy terima kasih banyak untuk kehadiran dan dukungan moral kepada penulis, semoga Allah selalu melimpahkan kasih sayang, kesehatan yang berkah dan kemurahan rezeki pada kita semua.
21. Familia boot Nauoly, Maunboot Hewai, maun Joao, pai joao, maun Asala buibau, maun asala venilale, maun Siko, Maun Amano bomberios, maun amano conductor amo bispo maum vasco, maun nando lahaluan agradece wain.

Akhir kata semoga segala bantuan yang diberikan selama ini dapat dicatat sebagai amal yang baik dan mendapat balasan dari Allah. Semoga Allah selalu memberikan limpahan rahmat, rejeki dan nikmat-Nya bagi kita semua. Amin.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Manfaat dan Tujuan .....	3
1.5 Kontribusi .....	3
1.6 Metodologi Penelitian.....	3
1.7 Harapan Hasil.....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka .....	7
2.2 Kajian Penelitian terkait.....	7
2.2.1 <i>Maximum power extraction from a partially shaded PV string using shunt-series compensation [34].</i> .....	9
2.2.2 <i>Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems [32].</i> .....	13
2.2.3 <i>Circuit Topology Study for Distributed MPPT in Very Large Scale PV Power Plants [2].</i> .....	17
2.3 Teori Dasar.....	19
2.3.1 Kontroler Proportional Integral Derivative (PID) .....	19
2.3.2 Kontroler <i>Fuzzy Logic</i> (FLC) .....	22
2.3.3 <i>Photovoltaic</i> (PV) String .....	26
2.3.4 <i>Maximun Power Point Tracking (MPPT)</i> .....	30



BAB 3 RANCANGAN SISTEM .....	31
3.1    Pendahuluan .....	31
3.2    Rancangan Algoritma Sistem .....	32
3.3    Desain Systeem Simulasi .....	33
3.3.1    Desain System PV Array .....	35
3.3.2    Rangkaian MPPT dan Converter DC to DC .....	39
3.3.3    Disign Mekanisme Cluster String PV .....	42
BAB 4 ANALISA DAN PENGUJIAN DESAIN .....	45
4.1    Pendahuluan .....	45
4.2    Parameter Pengujian .....	45
4.3    Pengujian Model PV Array .....	46
4.3.1    Pengujian P, V dan I Modul PV .....	46
4.3.2    Pengujian P, V dan I string PV .....	48
4.3.3    Pengujian P, V dan I PV array .....	51
4.4    Pengujian hasil MPPT berbasis P&O dan CUK Konverter .....	54
4.4.1    Pengujian output Duty Cycle .....	54
4.4.2    Pengujian output Rangkaian MPPT .....	56
4.4.3    Pengujian PV Array menggunakan metode yang diusulkan .....	60
BAB 5 PENUTUP .....	67
5.1    Kesimpulan .....	67
5.2    Saran .....	68
DAFTAR PUSTAKA .....	69
LAMPIRAN A .....	73
LAMPIRAN B .....	77
LAMPIRAN C .....	79
TENTANG PENULIS .....	83

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Teknik gabungan kompensasi arus dan tegangan .....	10
Gambar 2. 2 Flyback converter yang digunakan untuk kompensasi arus dan tegangan .....	10
Gambar 2. 3 Kasus pola bayangan ( <i>shading</i> ) pada kasus 3x3 PV <i>module</i> .....	11
Gambar 2. 4 Hasil simulasi tegangan modul PV pada kasus C1 .....	11
Gambar 2. 5 Hasil simulasi arus modul PV pada kasus C1 (a) string 1, (b) string 2, (c) string 3 .....	12
Gambar 2. 6 Hasil simulasi kompensasi arus modul PV pada kasus C1, (a) string 1, (b) string 2, (c) string 3 .....	12
Gambar 2. 7 Hasil simulasi pada kasus C1, (a) tegangan, arus, dan daya keluaran semua sistem, (b) tegangan keluaran 3 string sistem konverter seri, (c) arus keluaran 3 string sistem konverter seri .....	13
Gambar 2. 8 Model PV terhubung seri dengan penggunaan dioda <i>bypass</i> .....	13
Gambar 2. 9 Perbandingan output daya PV dengan dan tanpa dioda <i>bypass</i> .....	14
Gambar 2. 10 Sistem PV Multidimensi (a) Controlled by multiple controllers (b) Controlled by centralized controllers .....	15
Gambar 2. 11 Output characteristic of partially shaded multidimensional PV system with centralized controller .....	16
Gambar 2. 12 Appeared regions at output of partial shaded multidimensional PV system. ....	16
Gambar 2. 13 Topologi sistem PV skala besar secara umum .....	17
Gambar 2. 14 Topologi sistem PV skala besar menggunakan DMPPT .....	18
Gambar 2. 15 Daya maksimum yang didapatkan dengan tiga kasus DMPPT .....	18
Gambar 2. 16 Konfigurasi umum kontroler PID .....	19
Gambar 2. 17 Respons input unit step berbentuk huruf S .....	20
Gambar 2. 18 Sistem kalang tertutup dengan kontroler proporsional .....	21
Gambar 2. 19 Osilasi tetap dengan periode osilasi $P_{cr}$ [23] .....	21
Gambar 2. 20 Perbandingan: (a) logika tegas, dan (b) fuzzy logic .....	22
Gambar 2. 21 MF fuzzy logic .....	23
Gambar 2. 22 Struktur dasar <i>fuzzy logic</i> .....	25
Gambar 2. 23 <i>Junction antara semikonduktor tipe-p (kelebihan hole) dan tipe-n</i> <i>(kelebihan elektron)</i> .....	26
Gambar 2. 24 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip <i>p-n junction</i> .....	27
Gambar 2. 25 Rangkaian paralel seri sel surya .....	27
Gambar 2. 26 Karakteristik output <i>PV string</i> .....	28
Gambar 2. 27 Karakteristik output <i>PV string</i> terhadap variasi intensitas cahaya matahari .....	28
Gambar 2. 28 Model Ekuivalen <i>Photovoltaic Module</i> .....	28
Gambar 2. 29 Posisi d/d yang berbeda pada kurva daya panel surya .....	30
Gambar 3. 1 Follow chart block diagram sistem .....	32
Gambar 3. 2 Diagram simulasi sistem .....	33

Gambar 3. 3 Model cel surya .....	35
Gambar 3. 4 Blok parameter Modul cel surya.....	35
Gambar 3. 5 Model sistem pv string .....	36
Gambar 3. 6 Model sistem pv array .....	37
Gambar 3. 7 PVFarm yang Tertutup Bayangan Awan yang Melintas .....	37
Gambar 3. 8 Efek <i>Diode Bypass</i> pada <i>Modul Shaded</i> .....	38
Gambar 3. 9 Kurva Karakteristik P-V dengan Beberapa Puncak Daya .....	39
Gambar 3.10 Diagram Alir dari Algoritma PnO .....	39
Gambar 3. 11 Konverter dc-dc tipe cuk .....	40
Gambar 3. 12 Rangkaian kontrol konverter dc-dc .....	42
Gambar 3. 13 Surface kurva output.....	44
Gambar 4. 1 Rangkaian pengujian modul PV .....	46
Gambar 4. 2 Kurva karakteristik P vs V dari modul PV .....	47
Gambar 4. 3 Kurva karakteristik modul PV arus .....	47
Gambar 4. 4 Rangkaian pengujian karakteristik String PV .....	48
Gambar 4. 5 Kurva karakteristik string PV daya versus tegangan.....	48
Gambar 4. 6 Kurva karakteristik string PV Arus terhadap tegangan .....	49
Gambar 4. 7 Kurva karakteristik String PV daya terhadap tegangan.....	50
Gambar 4. 8 Pengujian kurva karakteristi arus terhadap tegangan .....	51
Gambar 4. 9 Diagram simulasi PV array.....	51
Gambar 4. 10 Kurva karakteristik PV array daya terhadap tegangan .....	53
Gambar 4. 11 Kurva karakteristik PV array Arus terhadap tegangan .....	54
Gambar 4. 12 Keluaran duty cycle .....	55
Gambar 4. 13 Besar Tegangan Keluaran MPPT PV Array .....	55
Gambar 4. 14 Besar Arus keluaran MPPT PV Array.....	56
Gambar 4. 15 Desain simulasi keluaran MPPT.....	56
Gambar 4. 16 Rangkaian arus converter DC to Dc Type Cuk Converter .....	57
Gambar 4. 17a Besar tegangan keluaran MPPT String PV .....	57
Gambar 4. 17b. Besar arus keluaran MPPT String PV .....	58
Gambar 4. 18 Diagram simulasi yang diusulkan.....	61
Gambar 4. 19 Diagram simulasi pengujian sistem.....	62
Gambar 4. 20 Diagram simulasi menggunakan MPPT .....	63
Gambar 4. 21 Diagram pengujian sistem menggunakan metode cluster .....	63

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data modul PV SM 30L, .....	10
Tabel 2. 2 Data aktual tegangan, arus, dan daya MPP pada modul PV SM 30L..	11
Tabel 2. 3 The maximum generated power for two PV strings without dc/dc converter .....	18
Tabel 2. 4 Parameter kontroler PID berdasarkan metode kesatu 22]	21
Tabel 3. 1 Prinsip Kerja fuzzy logic control .....	45
Tabel 4. 1 Tabel kondisi percobaan 1 .....	59
Tabel 4. 2 Besar tegangan, arus dan daya masuk dan daya keluaran.....	60
Tabel 4. 3 Besar tegangan, arus dan daya dengan cluster dan tanpa cluster.....	64
Tabel 4. 4 Besaran daya maupun efisiensi dari masing-masing peralatan.....	65
Tabel 4. 5 Porsentasi peningkatan daya .....	66

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada aplikasi kontrol sistem pembangkit tenaga matahari seperti photovoltaic, telah banyak dipelajari dan dibuat sistem kontrol dari metode konvensional hingga metode mutakhir menggunakan kecerdasan buatan [3]. Pengembangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk menghasilkan daya maksimal dari PV module juga telah banyak dikembangkan [1;3;29]; .Pada kasus PV string yang sebagian modulnya tertutup bayangan (shading), maka sistem kontrol berbasis MPPT ini tidak dapat bekerja dengan baik. Hal ini diakibatkan modul PV yang terkena shading berubah menjadi beban dan mendapat arus balik (reverse bias) yang berpotensi mengakibatkan kerusakan modul PV [29].

Selain penggunaan MPPT, aplikasi kontroler PID juga telah digunakan untuk pengembangan sistem PV dengan hasil yang cukup memuaskan, namun demikian masih perlu perbaikan terkait dengan nonlinieritas sistem akibat dinamika cuaca yang tidak konsisten [4;5]. Fuzzy Logic Control (FLC) telah banyak diaplikasikan untuk kontrol sistem PV module, dimana sistem kontrol ini mampu bekerja cukup baik dalam mengatasi ketidaklinieran sistem PV akibat adanya shading [7]. Kelemahan dari sistem yang dibuat adalah mekanisme desain dan parameter yang digunakan pada sistem FLC cukup kompleks dan perlu keahlian khusus (expertise) dalam desain.

Penelitian ini menggunakan suatu metode alternatif dalam memaksimalkan daya keluaran PV string dengan menggunakan rangkaian dioda bypass [13]. Penggunaan diode bypass ini mengakibatkan besar tegangan antar-modul PV menjadi berbeda-beda, sesuai jumlah modul yang mendapat shading pada penentuan titik Maximum Power Point (MPP). Untuk itu diusulkan suatu metode pengelompokan besar tegangan yang bersesuaian dari setiap keluaran hasil mekanisme MPPT, dimana setiap keluaran MPPT terhubung secara paralel pada rangkaian matrik saklar [14]. Logika rangkaian matriks saklar ini dibangkitkan menggunakan mekanisme inferensi logika Fuzzy (Fuzzy Logic). Selanjutnya masing-masing hasil pengelompokan dihubungkan ke suatu rangkaian regulator

berbasis kontroler Proportional-Integral-Derivatif (PID controller) yang berfungsi mengontrol besar tegangan setiap kelompok menjadi sama sesuai setpoint yang diinginkan. Untuk melihat hasil keluaran tegangan sudah mendekati optimal atau belum, hasil pengaturan ini diperbandingkan dengan hasil keluaran dari PV string yang dioptimasi dengan menggunakan metode MPPT saja.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Pada kasus PV string yang sebagian modulnya tertutup bayangan (shading), maka sistem kontrol berbasis MPPT tidak dapat bekerja dengan baik. Hal ini diakibatkan modul PV yang terkena shading berubah menjadi beban dan mendapat arus balik (reverse bias) yang berpotensi mengakibatkan kerusakan modul PV.

Untuk PV string memiliki beberapa PV module, diperlukan penggabungan keluaran semua modul untuk menghasilkan daya maksimal. Namun adanya perbedaan tegangan keluaran tiap modul membuat keluaran setiap PV module tidak bisa langsung digabungkan dengan prinsip rangkaian paralel.

## **1.3 Batasan Masalah**

Pada penelitian ini batasan masalah disesuaikan dengan tujuan dan kontribusi dari penelitian dimana perancangan model sistem PV string didesain menggunakan simulasi program Matlab berbasis PowerGUI, perancangan kontroler PID menggunakan Simulink Toolbox dan perancangan kontroler FLC menggunakan Fuzzy Toolbox pada software Matlab. Sistem yang dibangun terdiri dari PV string yang tersusun dari 4 modul PV dengan masing-masing modul berisi 72 sel surya. Proses memaksimalkan daya menggunakan Maksimum Power Point Traking (MPPT) berbasis *parturban and observe (P&O Methode)*. Penempatan MPPT pada masing-masing string PV. Selanjutnya dilakukan cluster berdasarkan besar tegangan string PV dengan hasil maskimal baik pada saat normal maupun saat mendapat efek shading.

#### **1.4 Manfaat dan Tujuan**

Penelitian ini ditujukan untuk perancangan dan analisa aplikasi metode inferensi logika fuzzy dan kontroler PID untuk memaksimalkan (Meningkatkan) daya keluaran dari PV Array pada kondisi normal maupun tertutup bayangan sebagian (*shading effect*).

#### **1.5 Kontribusi**

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan dua kontribusi utama, yaitu: (i) dari sisi perkembangan ilmu kontrol memberikan kontribusi dalam perancangan aplikasi inferensi logika fuzzy untuk rangkaian matriks saklar dan kontroler PID sebagai regulator tegangan keluaran PV; (ii) dari sisi implementasi memberikan kontribusi alternatif penggunaan metode kontrol untuk memaksimalkan daya keluaran PV dan perbaikan output sistem PV string dengan beban dan shading bervariasi.

#### **1.6 Metodologi Penelitian**

Metodologi penelitian yaitu merupakan tahapan pembahasan secara umum dari masing-masing bab pada buku ini. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan mempermudah bagi pembaca dan peneliti melihat proses dan langkah-langkah serta materi yang tertuang dalam buku ini dari tahap awal hingga ke tercapainya tujuan penulisan. Metodologi penulisan ini dilakukan meliputi beberapa tahapan antara lain:

##### **1. Studi Literatur**

Langkah pertama yaitu melakukan studi literatur untuk mendapatkan informasi sebanyak-banyaknya dalam penelitian ini. Peneliti melakukan beberapa pustaka yang terkait Photovoltaic (PV) meliputi prinsip kerja dengan karakteristik dalam kondisi ideal maupun tertutup bayangan (Shading) yang meliputi model solar cell PV, modul PV, string PV dan PV Array. Metode optimasi daya keluaran PV yang antara lain beberapa metode MPPT dan topologi sistem PV. Selain itu juga mengamati referensi terdahulu mekanisme kendali yang meliputi Fuzzy Logic Controller dan PID Controller.



## 2. Identifikasi Parameter

Pada tahap identifikasi parameter ini dilakukan proses identifikasi parameter-parameter model yang diusulkan meliputi solar modul, string Modul, PV array. Selain parameter model juga mengidentifikasi parameter yang terkait meliputi efek radiasi dan pola radiasi dalam kondisi tertutup bayangan (Shading) maupun uniform (Normal) tanpa gangguan. Selanjutnya melakukan identifikasi parameter kontroller meliputi controller regulator maupun cluster Fuzzy relay logic controller. Dimana Mekanisme clustering Berbasis Fuzzy relay controller ini yang menjadi usulan dan kebaruan dari penulisan buku ini.

## 3. Merancang Permodelan Sistem

Tahap selanjutnya ialah perancangan sistem, meliputi membangun sebuah model pembangkit listrik tenaga Photovoltaic dengan topologi cluster PV string berbais Cluster menggunakan metode Fuzzy Logic Relay Controller pada kondisi Uniform (ideal) maupun tertutup bayangan sebagian (shading). Dimana model system tersebut terdiri dari model PV array, optimasi daya PV array melalui mekanisme MPPT, Disign PID regulator controller, inverter serta disaigh Clustring Fuzzy Relay Logic Controller yang merupakan usulan dan kebaruan dari penelitian ini.

## 4. Simulasi Sistem

Tahap ini merupakan tahapan yang berkaitan dengan pembuatan program untuk mensimulasikan seluruh system yang dibangun. Dimana seluruh simulasi dilakukan dengan menggunakan software matlab berbasis Power Guy. Simulasi model system tersebut terdiri dari model PV array, optimasi daya PV array melalui mekanisme MPPT, Disign PID regulator controller, inverter, instrument ukur, parameter model dan gangguan serta disaigh Clustring Fuzzy Relay Logic Controller yang merupakan usulan utama dan kebaruan dari penelitian ini.

## 5. Analisa hasil Pengujian

Tahap ini ialah pengujian dan analisa system PV Array menggunakan mekanisme cluster yang diterapkan sudah sesuai dengan yang diharapkan. Jika hasilnya kurang maksimal bisa dilakukan perubahan atau modifikasi pada sistem

atau skema kontroler yang digunakan. Apabila telah memenuhi tujuan berarti penelitian telah berhasil, dan apabila belum memenuhi maka perlu dikaji lebih lanjut solusi atau gagasan alternative agar tujuan yang telah ditetapkan tercapai.

#### 6. Penarikan Kesimpulan

Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa tujuan penelitian telah tercapai maka akan ditarik kesimpulan untuk menegaskan bahwa gagasan yang diusulkan berhasil menyelesaikan permasalahan dan memenuhi tujuan penelitian.

#### 7. Penulisan Laporan

Tahapan akhir dari penelitian ini adalah penulisan laporan dengan tujuan agar semua hal yang telah dilakukan dapat terdokumentasikan.

### **1.7 Harapan Hasil**

Pada buku ini adapun tujuan dan harapan yang ingin dicapai dari hasil penelitian ini adalah dapat meningkatkan daya keluaran pada pembangkit PV array pada kondisi Uniform (Normal) maupun mendapatkan shading yang bervariasi. Dengan demikian maka penelitian ini dapat dijadikan suatu alternatif baru dalam rangka pengembangan penggunaan solar panel di dunia industri khususnya yang berskala besar.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Kajian Pustaka**

Pada aplikasi kontrol sistem pembangkit tenaga matahari seperti photovoltaic, telah banyak dipelajari dan dibuat sistem kontrol dari metode konvensional hingga metode mutakhir menggunakan kecerdasan buatan. Pengembangan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menghasilkan daya optimal dari PV modul juga telah banyak dikembangkan oleh beberapa penelitian. Selain penggunaan MPPT, aplikasi kontroler PID juga telah digunakan untuk pengembangan sistem PV dengan hasil yang cukup memuaskan, namun demikian masih perlu perbaikan terkait dengan nonlinieritas sistem akibat dinamika cuaca yang tidak konsisten. *Fuzzy Logic Control* (FLC) telah banyak diaplikasikan untuk kontrol sistem PV module, dimana sistem kontrol ini mampu bekerja cukup baik dalam mengatasi ketidaklinieran sistem PV akibat adanya shading.

Penelitian ini menggunakan suatu metode alternatif dalam mengoptimasi daya keluaran PV string dengan menggunakan rangkaian dioda bypass. Penggunaan diode bypass ini mengakibatkan besar tegangan antar-modul PV menjadi berbeda-beda, sesuai jumlah modul yang mendapat shading pada penentuan titik Maximum Power Point (MPP). Untuk mengamati dan menganalisa hasil-hasil penelitian terdahulu terkait, maka dilakukan beberapa kajian pustaka, seperti yang akan dibahas dalam beberapa sub-bab di bawah ini.

#### **2.2 Kajian Penelitian terkait**

Photovoltaic (PV) adalah sebuah peralatan yang digunakan untuk mengonversi energi dari energi radiasi matahari menjadi energi listrik. PV memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional. PV dengan energi primernya berupa energi radiasi matahari merupakan sebuah teknologi yang ramah lingkungan, dengan potensi yang sangat besar di daerah tropis seperti Indonesia. Pengembangan PV untuk daerah disekitar khatulistiwa merupakan salah satu solusi untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik. [1-2]

Dalam rangkaian PV Farm, modul PV mengikuti karakteristik dari tahanan tiap selnya ketika terkena radiasi sinar matahari. Dengan cangkupan area yang relatif luas, maka akan terdapat perubahan karakteristik yang cukup signifikan apabila radiasi sinar matahari yang mengenai semua modul PV tidak seragam. Ketidakseragaman radiasi sinar matahari yang mengenai area PV farm biasanya disebabkan karena beberapa hal. Salah satu diantaranya adalah faktor cuaca berupa pergerakan awan diatas PV farm. Pergerakan awan diatas PV farm sangat mungkin untuk meninggalkan jejak bayangan pada area PV farm. Bayangan yang menutupi PV farm bisa sangat tidak beraturan tergantung dari bentuk awan yang menutupi sinar matahari. Bayangan ini bisa jadi menutup keseluruhan PV farm, namun lebih sering menutup sebagian saja dari area PV Farm. Hal ini akan menjadi persoalan yang sulit untuk dicari solusinya, karena sangat sulit juga untuk memetakan kondisi ketidakseragaman ini. Pemetaan sebagai solusi dipandang kurang realistik karena berarti harus memiliki pola bentuk dan pergerakan awan pada area disekitar pembangunan PV farm setiap saat dan setiap waktu [3].

Kondisi ketidakseragaman radiasi matahari yang mengenai area PV Farm sering disebut sebagai fenomena partial shading. Atau fenomena tertutup variasi bayangan (TVB) [3].

Saat ini mulai banyak penelitian yang mencoba untuk memecahkan persoalan pengefektifan pemanenan energi pada PV farm. Salah satu metode yang sering digunakan adalah menggunakan metode Maximum Power Point Tracker (MPPT). Sebenarnya MPPT bisa digunakan untuk meningkatkan efektifitas dari pemanenan energi menggunakan modul PV, tetapi untuk modul PV skala besar, khususnya pembangkit energi listrik pada PV Farm, MPPT akan menemui kesulitan ketika area PV Farm terjadi ketidakseragaman penerimaan intensitas radiasi matahari. Kesulitan tersebut disebabkan algoritma MPPT hanya bisa mengoptimalkan daya yang terdapat pada titik lokal Maximum Power Point (MPP). Pada kondisi ketidakseragaman intensitas radiasi matahari, akan terdapat beberapa titik MPP, sehingga perlu metode lebih lanjut untuk mendapatkan titik MPP yang paling optimal (global optimum) [4-6].

Penggunaan algoritma yang lebih kompleks dalam pencarian titik MPP juga banyak dilakukan. Algoritma artificial intelligent (AI) seperti PSO, Firefly,

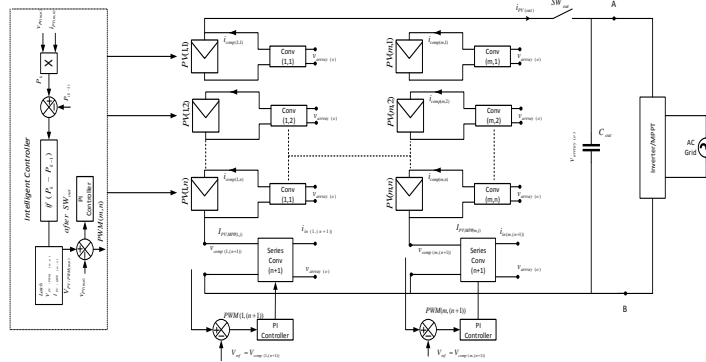
modified PnO yang diaplikasikan sebagai algoritma MPPT bisa digunakan untuk menentukan titik global optimum pada kondisi tertutup bayangan sebagian di satu modul PV. Namun metode ini belum cukup teruji untuk diimplementasikan pada hardware untuk skala yang lebih luas misalnya pada PV farm. [7-11]

Penelitian lain juga telah dilakukan dalam rangka mengembangkan kombinasi algoritma PnO dengan *Fuzzy Logic Control (FLC)* untuk mendapatkan titik MPP [11]. Pada metode ini controller MPPT berfungsi sebagai pengendali pergerakan duty-cycle dari konverter DC-DC.

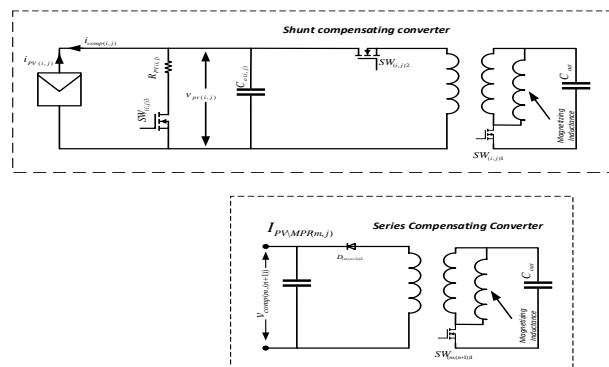
Dari kebanyakan metode yang ditawarkan, terutama metode MPPT masih diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk bisa digunakan pada PV Farm skala besar. Disamping itu dengan penggunaan MPPT pada setiap modul PV, akan menambah biaya investasi dari pembangunan pembangkit listrik menggunakan energi radiasi matahari.

### **2.2.1 *Maximum power extraction from a partially shaded PV string using shunt-series compensation* [34].**

Pada penelitian ini dianalisa karakteristik PV string dan cara mendapatkan daya maksimum pada kasus PV string terkena bayangan parsial (partially shaded). Pada kasus dimana PV string terkena bayangan, maka tiap modul PV akan memberikan tegangan keluaran yang tidak sama. Jika modul PV tersambung secara paralel pada PV string, ini akan mengakibatkan kebutuhan regulator tegangan pada tiap modul PV, karena jika disambungkan secara paralel maka tegangan output dari tiap modul harus sama. Alternatif yang diberikan pada penelitian ini adalah dengan membuat konfigurasi shunt (paralel) untuk keluaran arus dan konfigurasi seri untuk keluaran tegangan. Untuk masing-masing teknik konfigurasi digunakan konverter current-compensating dan konverter voltage-compensating. Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 menunjukkan konsep yang diberikan pada penelitian ini.



Gambar 2. 1 Teknik gabungan kompensasi arus dan tegangan



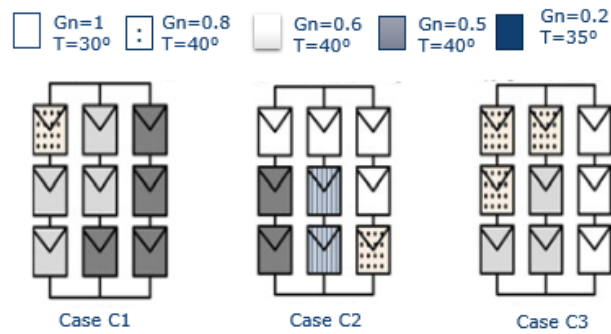
Gambar 2. 2 Flyback converter yang digunakan untuk kompensasi arus dan tegangan

Penelitian ini menggunakan Matlab-Simulink dengan data modul PV SM 30L, sebagaimana terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Data modul PV SM 30L,

Voc (V)	Isc (A)	V <sub>pv</sub> [MPP (V)	I <sub>pv</sub> [MPP (A)
20.8	1.93	17.3	1.74

Berbagai pola dan kondisi bayangan (*shading*) diujikan dengan menggunakan 3x3 PV array seperti terlihat pada Gambar 2.3



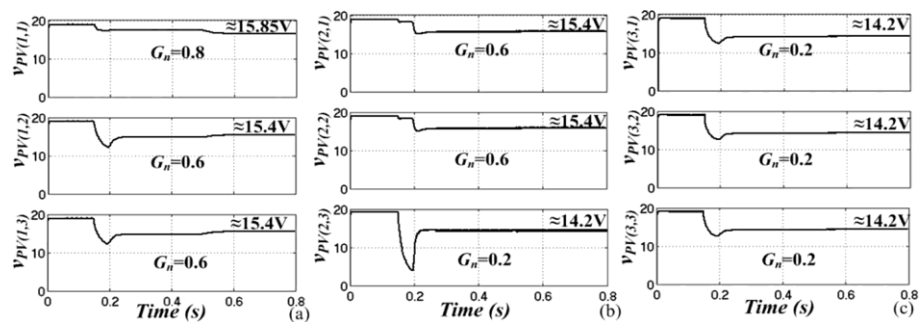
Gambar 2. 3 Kasus pola bayangan (*shading*) pada kasus 3x3 PV module

Tabel 2.2 memberikan data aktual tegangan, arus, dan daya MPP pada modul PV SM 30L untuk lima kondisi radiasi dan suhu.

Tabel 2. 2 Data aktual tegangan, arus, dan daya MPP pada modul PV SM 30L

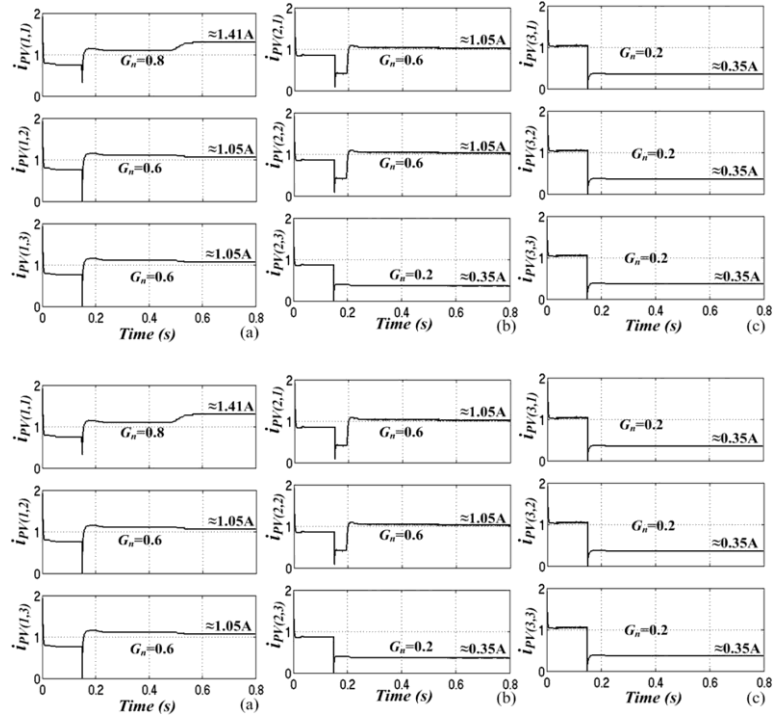
Shading condition	Gn (W/m <sup>2</sup> )	T (° C)	I <sub>pv</sub>  MPP (A) Module	V <sub>pv</sub>  MPP (V) Module	P <sub>pv</sub>  MPP (W) Module
1	1	40	16.5	1.74	29.23
2	0.8	40	15.85	1.41	22.3
3	0.6	40	15.4	1.05	16.3
4	0.5	40	15.14	0.88	13.3
5	0.2	35	14.25	0.35	4.9

Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 2.4 - 2.7.

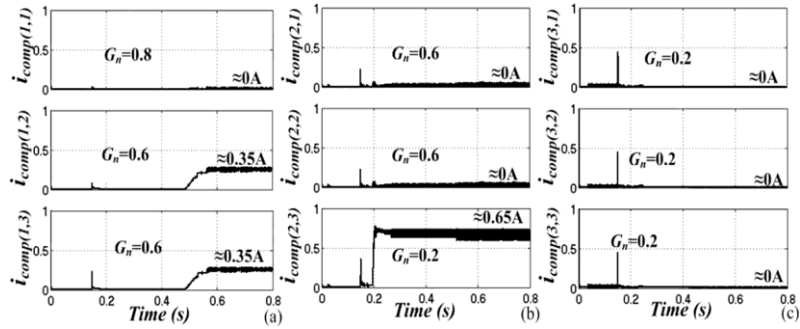


Gambar 2. 4 Hasil simulasi tegangan modul PV pada kasus C1

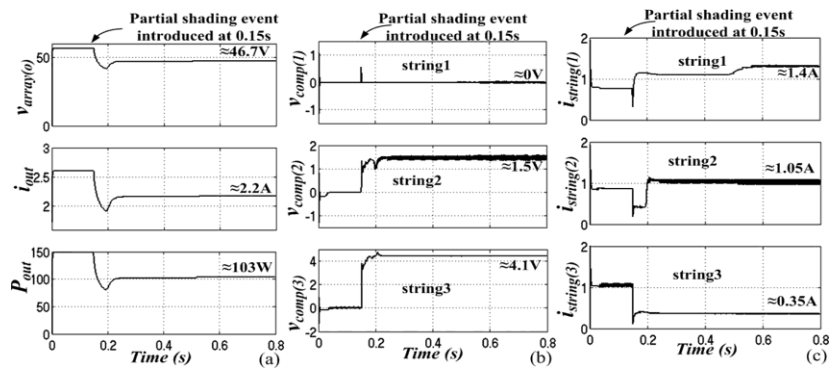




Gambar 2. 5 Hasil simulasi arus modul PV pada kasus C1 (a) string 1, (b) string 2, (c) string 3



Gambar 2. 6 Hasil simulasi kompensasi arus modul PV pada kasus C1, (a) string 1, (b) string 2, (c) string 3

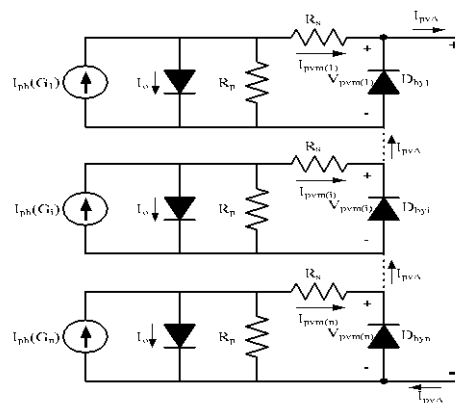


Gambar 2. 7 Hasil simulasi pada kasus C1, (a) tegangan, arus, dan daya keluaran semua sistem, (b) tegangan keluaran 3 string sistem konverter seri, (c) arus keluaran 3 string sistem konverter seri

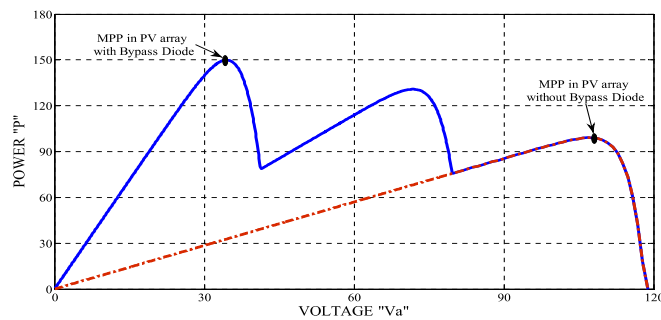
Penelitian ini menjelaskan metode baru yang terdiri dari shunt dan seri (tegangan) kompensasi dari modul dan string, masing-masing konverter arus kompensasi terhubung di shunt dengan setiap modul, dan konverter tegangan-kompensasi terhubung secara seri dengan setiap string. Ini memfasilitasi setiap modul PV untuk beroperasi pada MPP yang tepat dan memberikan daya maksimum. Kelemahan metode ini membutuhkan suatu peralatan tambahan berupa konverter arus injeksi untuk setiap modul dan konverter tegangan kompensasi untuk setiap string PV-nya.

### 2.2.2 Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems [32]

Pada penelitian ini dilakukan analisa pengaruh bayangan sebagian (partially shaded) pada sistem solar panel. Pemilihan sistem MPPT terhadap pola radiasi akibat adanya bayangan sebagian juga dianalisa. Pemodelan dan simulasi sistem photovoltaic (PV) dilakukan menggunakan software Matlab - Simulink. Penggunaan dioda bypass juga dianalisa untuk kasus ini. Gambar 2.8 memberikan ilustrasi penggunaan dioda bypass dan Gambar 2.9 menggambarkan perbandingan output PV dengan dan tanpa dioda bypass.



Gambar 2. 8 Model PV terhubung seri dengan penggunaan dioda *bypass*

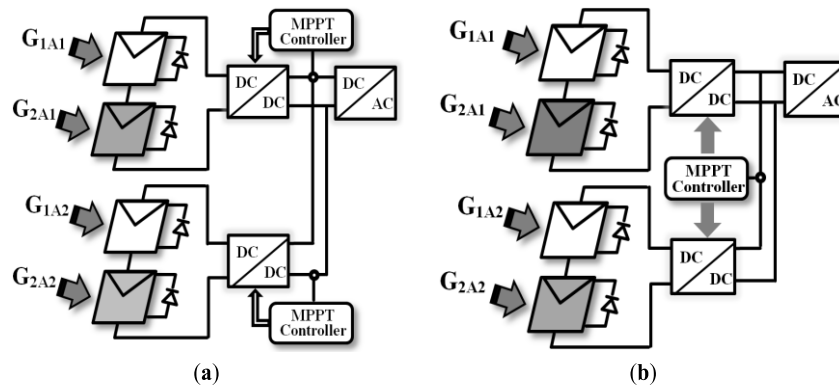


Gambar 2. 9 Perbandingan output daya PV dengan dan tanpa dioda *bypass*

Gambar 2.10 menunjukkan sistem PV multidimensi di mana setiap array PV dikendalikan oleh konverter DC / DC masing-masing. Terlepas dari kebutuhan yang tidak menguntungkan untuk banyak sensor dan transduser, sistem ini dapat meminimalkan efek naungan parsial sambil memenuhi permintaan beban. Salah satu solusinya adalah mempertimbangkan pengendali terpusat yang akan memasok pola bolak-balik yang diperlukan dari masing-masing konverter juga. Oleh karena itu, konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 11b diusulkan sebagai kompromi, untuk meningkatkan daya keluaran sistem PV dan mengurangi jumlah sensor yang dibutuhkan pada saat yang bersamaan. Keuntungan umum dari sistem PV multidimensi dapat secara singkat dinyatakan sebagai berikut:

1. Semakin rendah jumlah sensor dan transduser yang secara signifikan mengurangi keseluruhan biaya sistem.
2. Ruang yang lebih rendah yang dibutuhkan untuk unit kontrol, bahkan dalam sistem PV skala besar.
3. Fleksibilitas yang tinggi dari konfigurasi ini membantu para perancang mengembangkan sistem tanpa meningkatkan unit kontrol. Hanya beberapa amandemen dalam pemrograman yang diperlukan.
4. Dalam struktur ini, setiap array PV terdiri dari dua modul PV, yang dihubungkan secara seri dan dikendalikan oleh konverter DC / DC dan pengendali terpusat.

Beberapa struktur metode kontrol sistem PV multidimensi juga dianalisa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Sistem PV Multidimensi (a) Controlled by multiple controllers (b) Controlled by centralized controllers

sebuah studi kasus numerik dipertimbangkan. Dalam skema konvensional, pengendali menghasilkan pola switching tunggal untuk konverter individu sementara dalam skema multidimensional yang hemat biaya, pengendali terpusat diperlukan untuk menyediakan dua siklus tugas yang sesuai untuk dua konverter individual. Menemukan karakteristik keluaran sistem PV yang akurat dengan konfigurasi ini, dalam prosedur sederhana, sangat penting dimana fungsionalitas metode MPPT dapat dievaluasi. Pada awalnya, sistem dibagi menjadi array PV terpisah yang terhubung ke DC / DC converters yang terpisah.

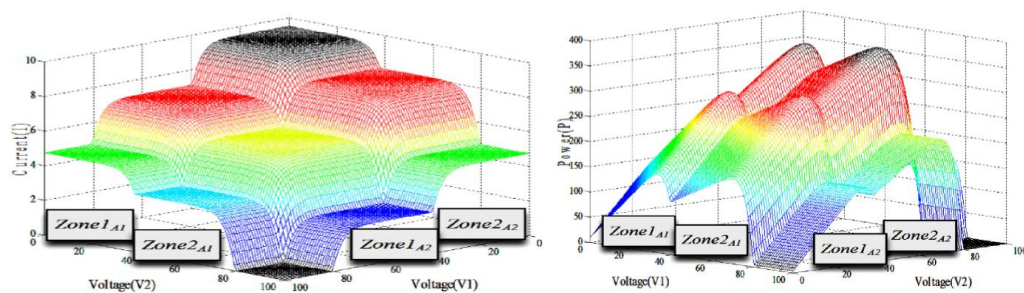
sistem harus dibagi menjadi dua susunan PV terpisah termasuk dua modul PV yang terhubung. Model matematis dari setiap susunan PV telah dibahas pada Bagian 3.2-4.1. Diasumsikan bahwa modul di dalam kedua susunan PV menerima tingkat radiasi  $G_{1A1} = 1.000 \text{ W / m}^2$ , dan  $G_{2A1} = 500 \text{ W / m}^2$ . Arus keluaran masing-masing susunan PV akan dihitung dengan menggunakan Persamaan (13). Akibatnya, karakteristik output dari setiap hasil array PV memiliki karakteristik serupa yang ditunjukkan pada Gambar 2. 10. Seperti disebutkan sebelumnya dalam konfigurasi Hemat Biaya, pengontrol utama melacak MPP untuk kedua susunan PV. Jadi karakteristik output akan menghasilkan karakteristik tiga dimensi yang ditunjukkan pada Gambar 2. 11. Pada gambar ini, sumbu X menunjukkan tegangan keluaran dari susunan pertama, sumbu Y Menunjukkan tegangan output dari array kedua dan sumbu Z menunjukkan arus keluaran [pada Gambar 2. 11 (a)] dan daya [pada Gambar 2. 11 (b)] dari keseluruhan sistem

PV. Gambar 2. 11 juga menunjukkan bagaimana kurva output dari dua array PV terlihat pada karakteristik output dari keseluruhan sistem PV.

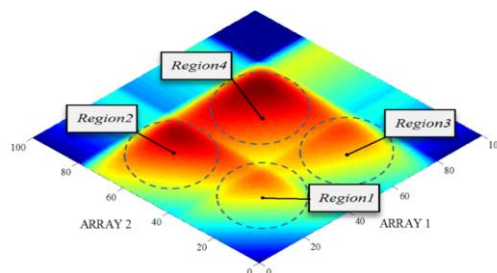
Zona yang ditunjukkan pada gambar ini persis seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.10 untuk setiap susunan PV. Kombinasi dari zona-zona ini akan menghasilkan empat daerah dalam karakteristik output dari sistem PV yang ditunjukkan pada Gambar 2. 13, di mana daerah-daerah didefinisikan oleh:

- Wilayah 1 = Kontribusi susunan PV di Zone2A2 + Zone1A1
- Wilayah 2 = Kontribusi susunan PV di Zone2A2 + Zone2A1
- Wilayah 3 = Kontribusi susunan PV di Zone1A2 + Zone1A1
- Wilayah 4 = Kontribusi susunan PV di Zone2A2 + Zone2A1

Grafik yang disajikan pada Gambar 12 menunjukkan empat wilayah berbeda yang ditandai oleh perbedaan karakteristik output yang diciptakan oleh masing-masing array. Ini juga membuktikan bahwa MPP terjadi di dalam wilayah di mana kontribusi array individu untuk menghasilkan kekuatan dimaksimalkan.



Gambar 2. 11 Output characteristic of partially shaded multidimensional PV system with centralized controller



Gambar 2. 12 Appeared regions at output of partial shaded multidimensional PV system.

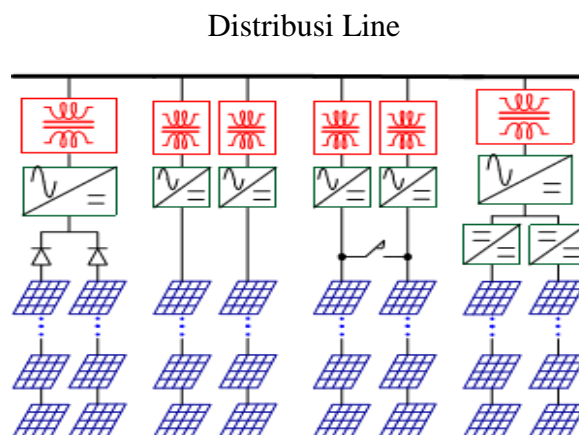
Pemodelan analitis sistem fotovoltaik harus mempertimbangkan semua parameter dari sistem PV dalam kondisi normal maupun partial shading. Kondisi partial shading disimulasikan secara bertahap menggunakan iradiasi G1 dan G2 dan

model PV yang dihubungkan seri dengan dioda bypass. Pembahasan kemudian dilanjutkan dengan pemodelan sistem PV multidimensi yang dikenal sebagai konfigurasi yang hemat biaya. Sistem ini secara signifikan dapat mengurangi jumlah sensor dan transduser digunakan dalam sistem kontrol. Aspek hemat biaya konfigurasi ini dapat menjadi lebih muncul pada skala besar.

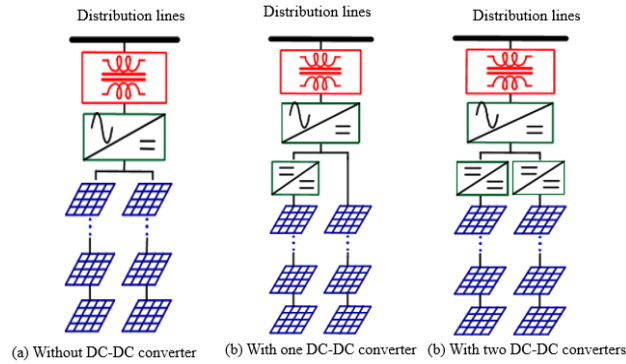
Hasil simulasi akhir pada penelitian ini membuktikan keandalan model yang diusulkan dalam mereplikasi karakteristik output tersebut dalam pengaturan yang ditentukan. Model yang diusulkan dipilih karena dapat dengan mudah mensimulasikan perilaku dari sistem PV dari modul PV tunggal melalui struktur PV multidimensi

### 2.2.3 *Circuit Topology Study for Distributed MPPT in Very Large Scale PV Power Plants [2].*

Pada plant PV skala besar (VLS-PV), akibat adanya *shading* mengakibatkan adanya titik-titik global MPP. Oleh karena itu dilakukan pelacakan distribusi maximum power point (DMPPT), untuk meningkatkan kemampuan daya output dengan meningkatkan jumlah unit *converter/inverter*. Gambar 2.13 memberikan ilustrasi pemodelan topologi sistem PV skala besar secara umum. Gambar 2.14 merupakan DMPPT yang digunakan dalam penelitian ini dan Gambar 2.15 memberikan hasil keluaran dari ketiga topologi DMPPT. Keterbatasan pada sistem ini adalah tegangan bus merupakan tegangan DC, daya output total belum maksimal, dan rendahnya rasio kemampuan konverter.



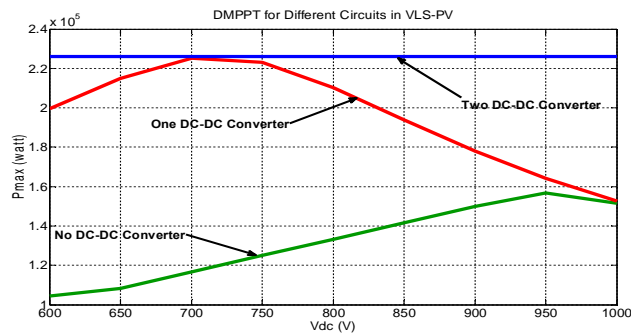
Gambar 2. 13 Topologi sistem PV skala besar secara umum



Gambar 2. 14 Topologi sistem PV skala besar menggunakan DMPPT

Tabel 2.3 The maximum generated power for two PV strings without dc/dc converter

Vdc (V)	$V_{pv1}$ (V)	$V_{pv2}$ (V)	$I_{pv2}$ (A)	$P_{max}$ (Watt)
		$\times 10^2$		$(\times 10^5)$
600	0.016046	6.283953	1.666001	1.045303
650	0.216046	6.283953	1.666000	1.082900
700	0.716045	6.283954	1.665999	1.166199
750	1.216045	6.283956	1.665997	1.249498
800	1.716043	6.283980	1.665992	1.332794
850	2.216019	6.284335	1.665923	1.416034
900	2.715664	6.289357	1.664909	1.498418
950	3.210642	6.335540	1.650527	1.568001
1000	3.664459	6.335540	1.515562	1.515562



Gambar 2. 15 Daya maksimum yang didapatkan dengan tiga kasus DMPPT

Dalam makalah ini, solusi converter DC/DC tunggal ditunjukkan sebagai alternatif topologi rangkaian pengondisi daya untuk pembangkit listrik VLSPV. Manfaat dari sirkuit ini untuk meng-upgrade sistem apabila converter DC/DC pada saat itu hanya satu buah. Hasil penelitian menunjukkan hanya dengan satu DC/DC converter, MPPT dapat dicapai peningkatan yang baik dibandingkan tanpa converter. Teknik pengendalian pada struktur rangkaian dan pilihan rangkaian baru juga diperkenalkan pada tulisan ini.

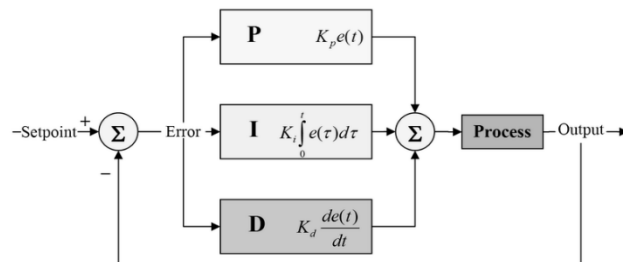
## 2.3 Teori Dasar

### 2.3.1 Kontroler Proportional Integral Derivative (PID)

Kontroler PID (Proportional Integral Derivative) merupakan kontroler untuk menentukan kepresisian suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik (feedback) pada sistem tersebut. Komponen PID terdiri dari 3 jenis, yaitu Proportional, Integral, dan Derivative. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri, tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu plant. Gambar 2.14 menunjukkan konfigurasi umum dari kontroler PID ini, dimana output dari kontroler diberikan oleh Persamaan 2.1[23].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Kontroler PID (Proportional Integral Derivative) merupakan kontroler untuk menentukan kepresisian suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik (feedback) pada sistem tersebut. Komponen PID terdiri dari 3 jenis, yaitu Proportional, Integral, dan Derivative. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri, tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu plant. Gambar 2.16 menunjukkan konfigurasi umum dari kontroler PID ini, dimana output dari kontroler diberikan oleh Persamaan 2.1 [23].



Gambar 2. 16 Konfigurasi umum kontroler PID



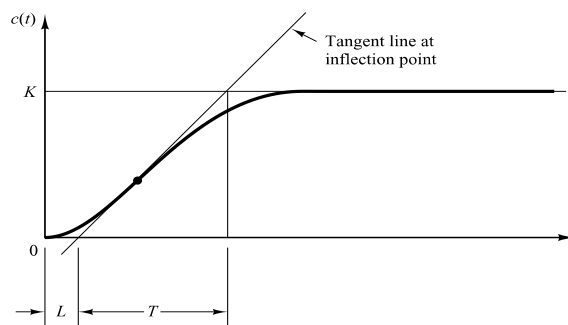
Ada 3 macam konfigurasi kontrol PID yaitu kontrol PI, PD, dan PID [23]. PI adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional* dan *integral*, PD adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional* dan *derivative*, dan PID adalah kontrol yang menggunakan komponen *proportional*, *integral*, dan *derivative*.

Berbagai penelitian telah dilakukan dalam mengeksplorasi kontroler PID, secara umum memberikan metode untuk melakukan *tunning* parameter kontroler [15;26]. Namun metode klasik seperti metode Ziegler-Nichols masih tetap menjadi pilihan utama dalam melakukan *tunning* parameter, karena kemudahan dan kesederhanaannya [6].

Terdapat dua metode aturan *tunning* parameter kontroler PID menggunakan metode Ziegler-Nichols, yang dapat dijelaskan sebagai berikut [23]:

#### *Metode Kesatu*

Pada metode kesatu ini, dilakukan percobaan dengan memberikan *plant* suatu input unit step. Jika *plant* tidak memiliki baik integrator tunggal maupun pole-pole dominan konjugat kompleks, maka respons dari input unit step akan berbentuk seperti huruf S, seperti terlihat pada Gambar 2.17. Metode ini hanya bisa digunakan jika respons dari input unit step berbentuk seperti pada gambar tersebut.



Gambar 2. 17 Respons input unit step berbentuk huruf S

Dari kurva S tersebut didapatkan dua konstanta, waktu tunda (delay time) L dan konstanta waktu (time constant) T. L dan T ditentukan dengan menggambar garis yang berhimpit dengan sebagian besar kurva S (bagian yang linier) dan garis

$c(t) = K$ , kemudian mencari waktu yang diperlukan sebagaimana pada Gambar 2.17. Nilai parameter kontroler PID ditentukan berdasarkan Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Parameter kontroler PID berdasarkan metode kesatu [22].

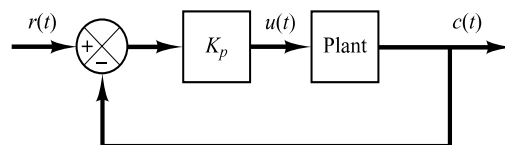
Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\infty$	0
PI	$0.9 T/L$	$L$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

Nilai parameter PID ditentukan berdasarkan Persamaan 2.2.

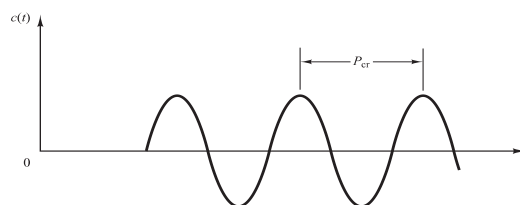
$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.2)$$

#### Metode Kedua

Pada metode kedua, pertama kali ditentukan parameter  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ , atau sama saja dengan menggunakan kontrol proportional saja, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.19. Naikkan nilai  $K_p$  dari 0 sampai ke suatu nilai kritis  $K_{cr}$  sehingga respons plant/output mulai terjadi osilasi (jika tidak terjadi osilasi untuk nilai  $K_p$  berapa pun, maka metode ini tidak bisa digunakan). Nilai  $P_{cr}$  (periode osilasi) ditentukan pada saat nilai  $K_{cr}$  tercapai, sebagaimana pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 18 Sistem kalang tertutup dengan kontroler proportional



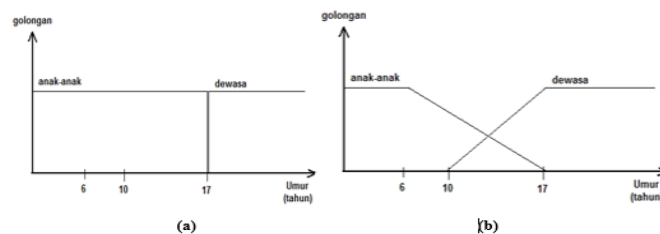
Gambar 2. 19 Osilasi tetap dengan periode osilasi  $P_{cr}$  [23].

Kontroler PID merupakan kontroler yang sederhana karena hanya menambahkan satu pole saja, sehingga respons-nya pun cepat. Namun demikian

memberikan hasil pengaturan yang cukup baik untuk plant-plant linier. Kelemahan dari kontroler ini adalah tidak bekerja optimal pada sistem/plant nonlinier dan tidak bisa digunakan pada sistem kontrol berbasis logika kecerdasan buatan [15;30].

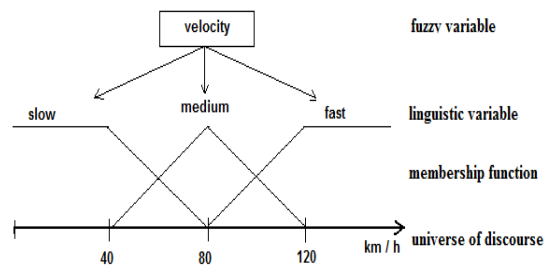
### 2.3.2 Kontroler *Fuzzy Logic* (FLC)

Fuzzy dapat disebut juga samar, kabur, ataupun tidak jelas. Fuzzy set pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh [4]. Himpunan samar atau fuzzy merupakan himpunan tanpa batas yang jelas, berkebalikan dengan himpunan klasik yang memiliki batasan tegas. Dalam himpunan fuzzy, batas antara “anggota himpunan” dan “bukan anggota himpunan” adalah bertahap dan perubahan perlahan dibentuk dengan fungsi keanggotaan yang memberikan fleksibilitas dalam memodelkan ekspresi linguistic (bahasa) yang biasa digunakan, sebagai contoh “airnya dingin” atau “suhu udara dingin”. Pada fuzzy logic, suatu hal dapat memenuhi lebih dari satu kategori yang memiliki tingkat derajat keanggotaan tertentu. Diperlukan suatu aturan tertentu yang harus dipenuhi dalam mengambil keputusan. Gambar 2.20 menunjukkan contoh logika tegas dan fuzzy logic.



Gambar 2. 20 Perbandingan: (a) logika tegas, dan (b) fuzzy logic

Variabel linguistik merupakan cara untuk mendefinisikan himpunan samar dengan variabel yang berupa kata atau kalimat. Gambar 2.21 menggambarkan variabel linguistik pada *fuzzy logic*. Variabel linguistik ini dinyatakan dengan ekspresi yang menggantikan nilai numeris. Penentuan ekspresi variabel linguistik disesuaikan dengan pengontrolan yang dilakukan



Gambar 2. 21 MF fuzzy logic

Fungsi keanggotaan merupakan suatu kurva yang menunjukkan pemetaan atau representasi titik-titik masukan data masukan ke dalam nilai keanggotaannya [27]. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Terdapat beberapa kurva yang digunakan untuk mendefinisikan fungsi keanggotaan, yaitu:

1. Fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership function*)
2. Fungsi keanggotaan trapesium (*trapezoidal membership function*)
3. Fungsi keanggotaan Gaussian (*Gaussian membership function*)
4. Fungsi keanggotaan lonceng (*bell membership function*)
5. Fungsi keanggotaan sigmoidal (*Sigmoidal membership function*)

Pada pengendali *Fuzzy logic* berlaku aturan-aturan tertentu yang menunjukkan proses pengendalian sistem. Secara umum aturan dituliskan sebagaimana Persamaan 2.3 [28].

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } y \text{ is} \quad (2.3)$$

dengan  $\bullet$  adalah operator (misal OR atau AND),  $x_i$  adalah skalar dan  $A_i$  adalah variabel linguistik.

Terdapat beberapa proses *fuzzy logic* yang harus dilakukan agar dari masukan yang diberikan dapat menghasilkan keluaran yang sesuai dengan keinginan, yaitu fuzzifikasi, penentuan basis pengetahuan, penentuan logika pengambilan keputusan, serta proses defuzzifikasi. Pembahasan fungsi dari masing-masing proses perancangan *fuzzy logic* adalah sebagai berikut [28]:

dengan  $\bullet$  adalah operator (misal OR atau AND),  $x_i$  adalah skalar dan  $A_i$  adalah variabel linguistik.

Terdapat beberapa proses *fuzzy logic* yang harus dilakukan agar dari masukan yang diberikan dapat menghasilkan keluaran yang sesuai dengan keinginan, yaitu fuzzifikasi, penentuan basis pengetahuan, penentuan logika pengambilan keputusan, serta proses defuzzifikasi. Pembahasan fungsi dari masing-masing proses perancangan *fuzzy logic* adalah sebagai berikut [28]:

*a. Fuzzifikasi*

Proses ini berfungsi untuk mengubah sinyal masukan yang bersifat *crisp* (nilai tegas) ke himpunan fuzzy dengan menggunakan operator fuzzifikasi. Secara simbolis fuzzifikasi dapat ditunjukkan Persamaan 2.4.

$$x = \text{fuzzifier}(x_o) \quad (2.4)$$

Keterangan dari Persamaan 2.4 diketahui  $x_o$  adalah masukan nyata (*crisp*) yang berasal dari sistem fisis,  $x$  adalah himpunan *fuzzy*, dan fuzzifier menyatakan operasi fuzzifikasi. Fungsi fuzzifikasi antara lain untuk mengukur nilai variabel masukan, melakukan pemetaan berskala, dan merumuskan fungsi fuzzifikasi yang merubah data masukan ke dalam nilai linguistik yang sesuai.

*b. Basis Pengetahuan*

Bagian ini berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan *fuzzy* atas daerah-daerah masukan dan keluaran dan menyusunnya dalam perangkat aturan kontroler. Basis data terdiri dari data-data yang berhubungan dengan semesta pembicaraan dan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* masukan serta keluaran, sedangkan basis aturan merupakan kumpulan aturan-aturan kontrol yang biasanya dinyatakan dalam bentuk “jika – maka”.

*c. Logika Pengambilan Keputusan*

Proses ini merupakan inti dari *fuzzy logic* yang meniru logika manusia. Aksi aturan *fuzzy* disimpulkan menggunakan implikasi *fuzzy* dan mekanisme inferensi *fuzzy*. Beberapa hal yang berhubungan dengan pengambilan keputusan *fuzzy* adalah definisi implikasi *fuzzy* (*fuzzy implication*), operator komposisi (*compositional operator*), pengertian kata penghubung “dan”, “atau”, dan “juga”, serta mekanisme penarikan kesimpulan (*inference mechanism*).

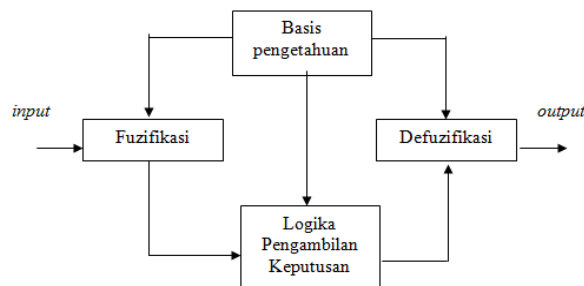
*d. Defuzzifikasi*

Proses ini berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi yang bersifat *fuzzy* menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator defuzzifikasi. Secara simbolis, defuzzifikasi dapat dinyatakan pada Persamaan 2.5.

$$z_0 = \text{defuzzifier}(z) \quad (2.5)$$

Keterangan dari Persamaan 2.5 diketahui  $z_0$  adalah bilangan *crisp* yang merupakan bilangan nyata proses defuzzifikasi,  $z$  adalah bilangan *fuzzy* dan defuzzifier menyatakan operasi defuzzifikasi. Ada beberapa strategi defuzzifikasi yang dapat digunakan pada kendali *fuzzy* dengan menggunakan metode Mamdani [19].

Proses-proses tersebut ditampilkan melalui diagram struktur dasar *fuzzy logic* pada Gambar 2.22 [19]. Proses diawali dengan fuzzifikasi input *fuzzy logic*. Kemudian dilakukan pengambilan keputusan berdasarkan logika pengontrolan. Proses diakhiri dengan didapatnya output yang dihasilkan dari defuzzifikasi. Basis pengetahuan dijadikan sebagai acuan keseluruhan proses yang terjadi.



Gambar 2. 22 Struktur dasar *fuzzy logic*

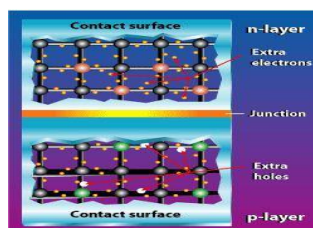
Perkembangan kontrol logika *fuzzy* sendiri sudah sedemikian pesatnya [16]. Banyak penelitian telah dikembangkan untuk memperbaiki metode tersebut, termasuk menggabungkannya dengan metode kontrol lain. *Fuzzy control* diperbaiki untuk meningkatkan proses adaptasinya dengan menambahkan konsep *adaptive* dan *neural network* [15;27], meningkatkan optimasi parameter kontrolnya dengan menerapkan konsep-konsep optimasi [8;9], meningkatkan *robustness*-nya dengan kontrol *robust* [23;24], dan juga menggabungkan dengan metode kontrol lain seperti kontroler [14;31].

Selain sebagai kontrol proses, *fuzzy logic* juga dapat digunakan untuk keperluan pengelompokan(*clustering*) sebagai bagian dari suatu sistem kontrol cerdas [30;32]. Kelebihan ini dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki sistem kontrol konvensional yang memerlukan pengelompokan kondisi operasional.

### 2.3.3 Photovoltaic (PV) String

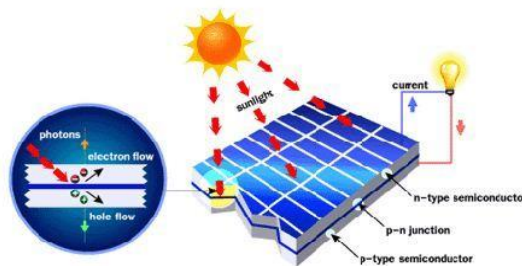
Sel surya adalah komponen paling fundamental dalam sistem photovoltaic (PV) yang merupakan piranti yang berfungsi untuk mengubah energi matahari (solar) menjadi energi listrik. Pada umumnya, deretan PV (PV string) disusun oleh banyak sel surya dengan konfigurasi seri maupun paralel untuk mendapatkan arus, tegangan, maupun daya yang diinginkan [21]. Setiap sel surya dapat disamakan dengan dioda yang terbuat dari material semikonduktor dengan hubungan p-n (p-n junction). Ketika junction tersebut menerima cahaya matahari, maka akan menghasilkan arus listrik melalui proses efek photovoltaic.

Sel surya konvensional bekerja menggunakan prinsip p-n junction, yaitu junction antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan hole (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan hole tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom dopant. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor. Ilustrasi gambar 2. 23 menggambarkan junction semikonduktor tipe-p dan tipe-n.



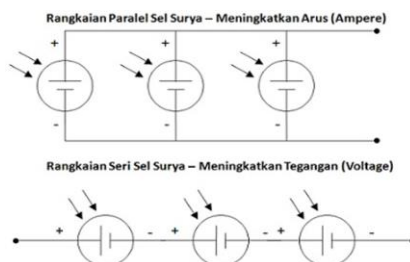
Gambar 2. 23 Junction antara semikonduktor tipe-p (kelebihan hole) dan tipe-n (kelebihan elektron).

Peran dari p-n junction ini adalah untuk membentuk medan listrik sehingga elektron (dan hole) bisa diekstrak oleh material kontak untuk menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari aliran elektron dan hole ini maka terbentuk medan listrik yang mana ketika cahaya matahari mengenai susuna p-n junction ini maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik, dan sebaliknya hole bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang, seperti diilustrasikan pada gambar 2.24.



Gambar 2. 24 Ilustrasi cara kerja sel surya dengan prinsip *p-n junction*

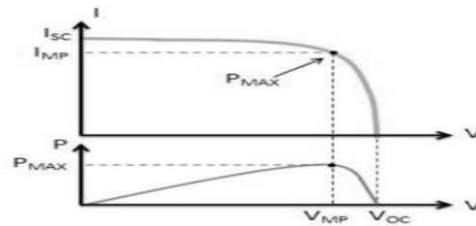
Seperti Baterai, Sel Surya juga dapat dirangkai secara Seri maupun Paralel. Pada umumnya, setiap Sel Surya menghasilkan Tegangan sebesar 0,45 ~ 0,5V dan arus listrik sebesar 0,1A pada saat menerima sinar cahaya yang terang. Sama halnya dengan Baterai, Sel Surya yang dirangkai secara Seri akan meningkatkan Tegangan (Voltage) sedangkan Sel Surya yang dirangkai secara Paralel akan meningkatkan Arus(Current).



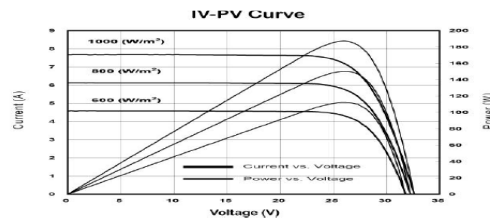
Gambar 2. 25 Rangkaian paralel seri sel surya



Kurva karakteristik dari output daya terhadap tegangan (P-V curve) dan output arus terhadap tegangan (I-V curve) diperlihatkan pada Gambar 2.27 [20]. Dapat dilihat bahwa daya maksimum bisa dicapai berdasarkan kurva karakteristiknya. Gambar 2.26 memperlihatkan karakteristik dari PV string terhadap perubahan intensitas cahaya [20].

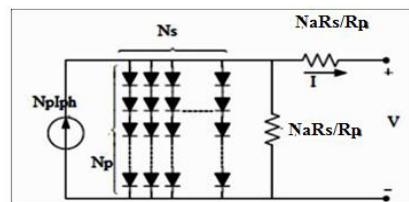


Gambar 2. 26 Karakteristik output *PV string*



Gambar 2. 27 Karakteristik output *PV string* terhadap variasi intensitas cahaya matahari

Modul *photovoltaic* (*PV module*) merupakan kumpulan banyak sel surya (*photovoltaic cells*) yang biasanya terhubung secara seri maupun paralel. Model ekivalen yang menyatakan *PV module* yang dengan konfigurasi sel surya sebanyak  $N_p$  secara paralel dan  $N_s$  secara seri dinyatakan oleh Gambar 2.28 [18]. Jika sel-sel tersebut terhubung secara paralel, maka tegangan output total adalah sama dengan tegangan output satu sel dan arus outputnya merupakan penjumlahan arus output semua sel. Karena satu solar sel bisa memiliki arus hingga 3 A dengan tegangan output kurang dari 0.7 V, maka koneksi secara paralel jarang digunakan.



Gambar 2. 28 Model Ekivalen *Photovoltaic Module*

Persamaan arus output dari model pada Gambar 2.29 dinyatakan oleh Persamaan 2.6 [18].

$$I \left( 1 + \frac{R_s T}{R_p T} \right) = N_p I_{sc} - N_p I_o \left( \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + I R_s T \right)}{A K T_c} \right) - 1 \right) - \frac{\left( \frac{V}{N_s} \right)}{R_p T} \quad (2.6)$$

dengan total tahanan paralel (*shunt resistance*) adalah:

$$R_p T = \frac{N_p}{N_s} R_p$$

dan total tahanan seri (*series resistance*) adalah:

$$R_s T = \frac{N_s}{N_p} R_s$$

Metode Newton Raphson digunakan untuk mencari akar dari fungsi nonlinier untuk mendapatkan titik maksimumnya [24], sebagaimana Persamaan 2.7.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad (2.7)$$

Maka fungsi dari arus dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.8.

$$f(I) = I \left( 1 + \frac{R_s T}{R_{sh} T} \right) - N_p I_{sc} + N_p I_o \left( \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + I R_s T \right)}{A K T_c} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_{sh} T} \quad (2.8)$$

Turunan dari f(I) dinyatakan oleh Persamaan 2.9.

$$f'(I) = \left( 1 + \frac{R_s T}{R_{sh} T} \right) - N_p \frac{q R_s T}{A K T_c} I_o \left( \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + I R_s T \right)}{A K T_c} \right) \right) \quad (2.9)$$

*PV string* merupakan gabungan dari sejumlah *PV module*, yang biasanya terhubung secara seri untuk menaikkan besar arus outputnya. Banyak penelitian

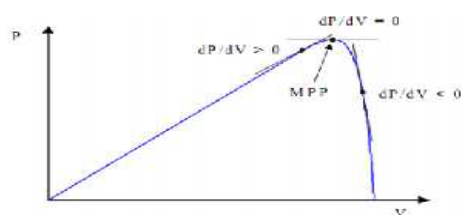
telah dilakukan untuk melakukan proses kontrol tegangan/arus/daya pada sistem *PV string* ini [10;12], di antaranya bahkan sudah menggunakan kontrol *artificial intelligent* [17], namun aplikasinya masih belum cukup optimal. Kebanyakan aplikasi kontrol cerdas digunakan untuk kontrol *PV module* dalam mode *stand-alone* dan tidak terkoneksi ke grid.

Penelitian ini mengusulkan konsep kontrol terintegrasi menggunakan dua kontroler: PID dan *Fuzzy Logic Controller*; untuk mengatur stabilitas tegangan pada *PV string* dengan variasi beban dan *shading*

#### 2.3.4 *Maximun Power Point Tracking (MPPT)*

MPPT merupakan sistem elektronik yang dioperasikan pada sebuah panel surya sehingga panel surya bisa menghasilkan daya maksimum. [15]. Cara kerja dari MPPT ini adalah dengan mengubah titik operasi atau titik kerja pada kurva karakteristik P-V dari panel surya sehingga sistem DC/DC converter dapat memaksa panel surya untuk membangkitkan daya maksimum sesuai kemampuan panel surya pada setiap perubahan level intensitas penyinaran matahari. [9].

Metode *Perturb and Observe* terdiri dari 2 tahap, *perturb* yaitu mengubah dan *observation* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika perubahan daya positif maka *perturb* selanjutnya akan tetap pada arah yang sama, sedangkan jika perubahan daya negatif maka *perturb* akan dibalik.



Gambar 2. 29 Posisi d/d yang berbeda pada kurva daya panel surya

## BAB 3

### RANCANGAN SISTEM

#### 3.1 Pendahuluan

Parameter yang menjadi fokus penelitian ini adalah kemampuan sistem kontrol yang dirancang untuk mengoptimalkan tegangan keluaran dari sistem PV *string* yang terdiri dari 4 modul PV dengan variasi beban dan bayangan sebagian (*partially shading*). Sistem kontrol yang dirancang meliputi: (a) penggunaan sistem inferensi logika *fuzzy* untuk mengatur rangkaian matriks saklar sebagai pengelompok (*clustering*) tegangan keluaran modul PV, dan (b) penggunaan kontroler PID sebagai regulator tegangan pada tiap-tiap klaster tegangan sehingga sesuai dengan setpoint tegangan yang diinginkan.

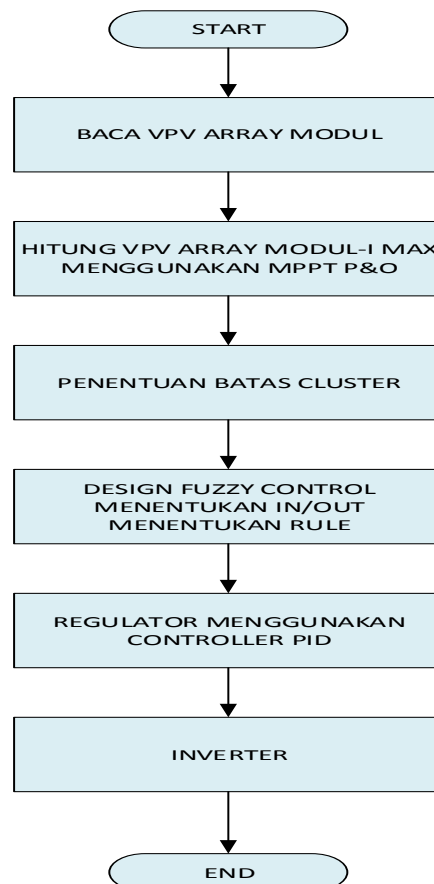
Kontroler PID yang digunakan menggunakan struktur yang memungkinkan berdasarkan referensi [18], sedangkan konsep kontrol FLC akan menggunakan mekanisme inferensi Takagi-Sugeno yang terkenal karena kesederhanaan inferensinya [26]. Model PV string dan mekanisme kontrol pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Untuk analisa hasil terbaik, rancangan umum sistem kontrol pada PV *string* akan dibuat sebagaimana pada Gambar 3.1. Kontrol *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan *perturb and observe (P&O method)* [17]. Rangkaian saklar diaktifkan oleh inferensi logika *fuzzy* yang berfungsi mengelompokkan output tegangan modul PV pada tiga (3) kelompok tegangan output. Ketiga tegangan output ini nanti yang menjadi masukan regulator tegangan dan akan diregulasi sesuai *setpoint* tunggal ( $SP1 = SP2 = SP3$ ) menggunakan kontroler PID. Semua simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab (Simulink Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, dan PowerGUI Toolbox) ditujukan untuk mendapatkan tegangan output string yang optimal.

### 3.2 Rancangan Algoritma Sistem

Algoritma sistem kontrol yang akan didesain dapat dilihat pada Gambar 3.2. Fungsi dari inferensi logika *fuzzy* adalah mengelompokkan output tegangan modul PV pada tiga (3) kelompok tegangan output, selanjutnya untuk tiap kelompok tegangan output diregulasi menggunakan kontrol PID agar menghasilkan tegangan output yang sama untuk mempermudah sinkronisasi tegangan keluaran.

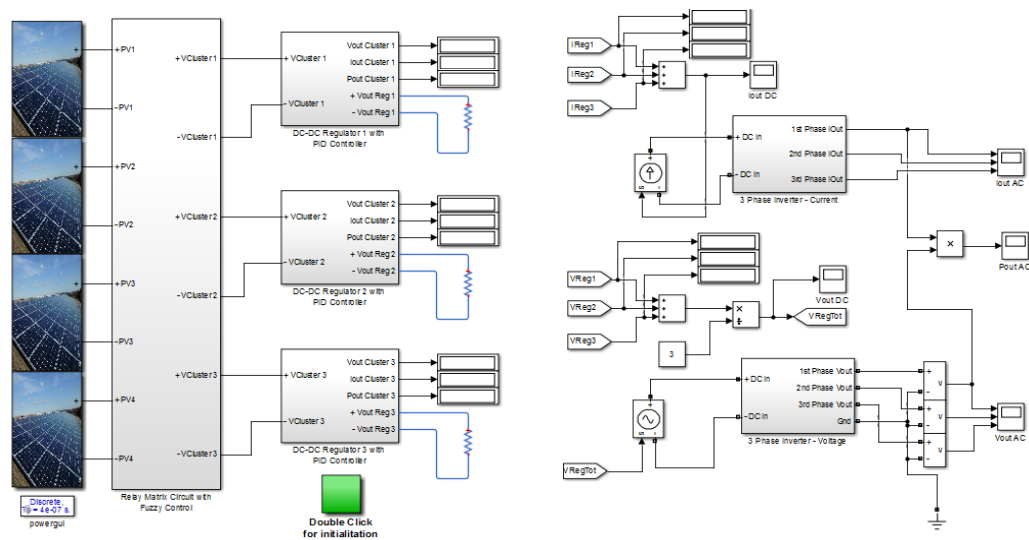
Gambar dibawah ini memperlihatkan blok diagram system desain secara menyeluruh. Konfigurasi sistem yang diusulkan dalam penelitian ini adalah sebagaimana terlihat pada gambar 3.1. Sementara fokus penelitan adalah pada pengoptimalan daya pv array dengan pokok permasalahan desain regulator dengan pendekatan baru menggunakan kombinasi dari topologi yang dibentuk oleh kombinasi mekanisme MPPT untuk setiap stringnya dan mekanisme *Cluster* dengan algoritma Fuzzy dalam rangka pengoptimalan daya keluaran dari system pembangkit PV.



Gambar 3. 1 Follow chart block diagram sistem

### 3.3 Desain Sistsem Simulasi

Perencanaan simulator sebagai salah satu metode verifikasi pengujian berdasarkan simulasi menggunakan software simulasi. software yang digunakan adalah Matlab berbasis GUI. Simulator ini dibuat dengan tujuan sebagai pembuktian awal bahwa metode yang diusulkan bisa bekerja dengan baik dalam variabel kondisi yang relatif terkendali dan ideal. Rangkaian simulasi sistem yang dibangun pada software simulasi, dibuat sama dengan parameter semua komponen yang digunakan pada perencanaan system. Dibawah ini adalah gambar rangkaian simulasi system pada penelitian ini



Gambar 3. 2 Diagram simulasi sistem

Konfigurasi penelitian ini terdiri dari beberapa model blok sub system antara lain :

1. Model PV Array
2. MPPT
3. Mekanisme Cluster
4. Regulator
5. Inverter 3 fasa.

Konfigurasi Sistem MPPT Baru Berbasis *Cluster*, dapat dilihat bahwa sistem PV *Farm* dimodelkan sebagai sebuah miniatur PV Array skala besar. PV array ini dibentuk dari empat (4) string PV, dimana masing-masing string

terdiri dari dua belas (12) buah modul PV dengan kapasitas daya maksimum 250 watt, sehingga total modul PV yang digunakan adalah 48 modul PV dengan total daya kapasitas terpasang sebesar 12000 Watt peak.

Konverter DC-DC yang tertanam algoritma MPPT berbasis P n O digunakan untuk menjejak daya puncak dimasing-masing string PV sebelum dilakukan proses Cluster tegangan menggunakan *Cuk Converter*.

Metode *Clustering* menggunakan tiga kelompok pilihan besar tegangan keluaran, yang kontrol menggunakan algoritma Fuzzy Takagi Sugeno. Sebuah *kontrol berbasis fuzzy* digunakan sebagai pengendali dari metode *Clustering*. Hal ini dilakukan untuk menentukan pengelompokan level tegangan string PV yang masuk pada 3 buah regulator tegangan melalui rangkaian matrik switch.

Rangkaian ini terdiri dari matriks relay yang bekerja sebagai saklar magnetis yang akan memisahkan dan menentukan setiap kelompok tegangan string PV hasil mekanisme MPPT masuk ke rangkaian regulator dengan level tegangan yang telah ditentukan.

Ketiga keluaran tegangan output hasil mekanisme cluster berbasis matriks switch ini dijadikan masukan rangkaian regulator tegangan. Selanjutnya oleh rangkaian regulator meregulasi sesuai *setpoint* tunggal ( $SP1 = SP2 = SP3$ ) menggunakan kontroler PID.

Hasil keluaran rangkaian regulator yang telah memiliki tegangan namun dalam bentuk tegangan dc to dc selanjutnya diteruskan ke rangkaian inverter 3 fasa. Hal ini untuk merubah tegangan dc dari keluaran rangkaian regulator menjadi tegangan ac 3 fasa yang nantinya akan diteruskan ke beban.

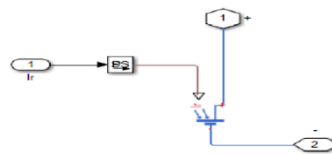
Semua simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab (Simulink Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, dan PowerGUI Toolbox) ditujukan untuk mendapatkan keluaran daya dengan besar tegangan output string yang optimal sehingga daya yang dihasilkan juga akan optimal.

### 3.3.1 Desain System PV Array

System PV Array pada penelitian ini merupakan gambaran mini dari suatu Pembangkit Listrik Tenaga Matahari skala besar. Dimana PV Array dikombinasikan dari 48 buah modul yang terdiri dari 4 string PV dan setiap string PV terdiri dari 12 Modul PV dengan total daya keluaran adalah 12000 Wpeak.

#### a. Design Model Modul PV

Modul PV pada penelitian ini diujikan secara simulasi menggunakan software matlab bernasis GUI. Model Modul PV yang digunakan seperti terlihat pada gambar dibawah ini, dimana masukan  $I_r$  adalah besar variasi radiasi yang menyentuh permukaan diode.



Gambar 3. 3 Model cel surya

Untuk mendapatkan daya dan besar tegangan per modul PV sesuai dengan perencanaan maka besar parameter dari rangkaian tersebut disesuaikan semirip mungkin. Pada penelitian besar parameter yang digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Solar Cell

This block models a solar cell as a parallel combination of a current source, two exponential diodes and a parallel resistor,  $R_p$ , that are connected in series with a resistance  $R_s$ . The output current  $I$  is given by

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( e^{\frac{(V+I R_s)}{N V_t}} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{\frac{(V+I R_s)}{N_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{(V+I R_s)}{R_p}$$

where  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  are the diode saturation currents,  $V_t$  is the thermal voltage,  $N$  and  $N_2$  are the quality factors (diode emission coefficients) and  $I_{ph}$  is the solar-generated current.

Models of reduced complexity can be specified in the mask. The quality factor varies for amorphous cells, and typically has a value in the range of 1 to 2. The physical signal input  $I_r$  is the irradiance (light intensity) in  $W/m^2$  falling on the cell. The solar-generated current  $I_{ph}$  is given by  $I_r \cdot (I_{ph0}/I_{r0})$  where  $I_{ph0}$  is the measured solar-generated current for irradiance  $I_{r0}$ .

Settings

Cell Characteristics	Configuration	Temperature Dependence
Parameterize by:	By s/c current and o/c voltage, 5 parameter	
Short-circuit current, $I_{sc}$ :	7.82	A
Open-circuit voltage, $V_{oc}$ :	0.6202	V
Irradiance used for measurements, $I_{r0}$ :	1000	$W/m^2$
Quality factor, $N$ :	1.6	
Series resistance, $R_s$ :	5.1e-3	Ohm

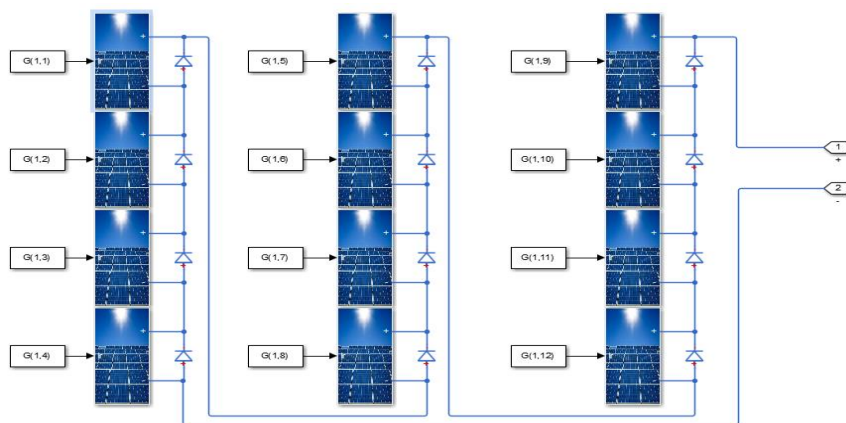
Gambar 3. 4 Blok parameter Modul cel surya



Dari gambar blok parameter Modul (solar cell) adalah terdiri dari tiga bagian utama antara lain cell parameter, konfigurasi dan temperature depedence. Pada penelitian ini besar arus *short-circuit* ( $I_{sc}$ ) adalah 7.82 A, Tegangan *Open Circuit* ( $V_{oc}$ ) = 0.6202, besar radiasi maximum  $1000 \text{ W/m}^2$ , quality faktor 1,6 dan Tahanan seri ( $R_s$ ) =  $5.1 \times 10^{-3} \text{ ohm}$ .

#### a. Design Model String PV.

Model string PV pada penelitian terdiri dari 12 buah modul PV yang dirangkai secara seri seperti terlihat pada gambar dibawah ini. Dimana parameter radiasi digambar dalam bentuk  $G(y, x)$  yang artinya  $G$  adalah besar radiasi yang menyentuh permukaan Modul PV yang terletak pada modul ke  $y$  dan string ke  $x$ . Sebagai contoh  $G(2,4)$  adalah sama dengan radiasi yang dialami modul PV baris ke dua dari string ke 4 pada PV Array. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

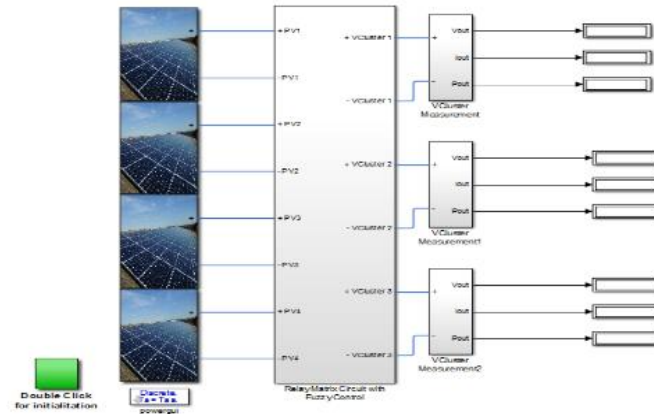


Gambar 3. 5 Model sistem pv string

#### b. Desain Model PV Array.

Medel PV array yang dilakukan pada penelitian menggambarkan suatu string yang di paralel dimana setiap string memiliki jumlah modul yang sama. Dalam prakteknya dapat juga diterapkan untuk jumlah modul yang tidak sama untuk setiap stringnya namun memiliki batas maksimum tegangan dan arus yang sama. Pemilihan model rangkaian seperti ini selain pengoptimalan daya juga dalam rangka pembangunan dapat dilakukan secara bertahap dan berkesinambungan. Hal tersebut dikarenakan masing masing rangkaian MPPT sudah didesain menyatu

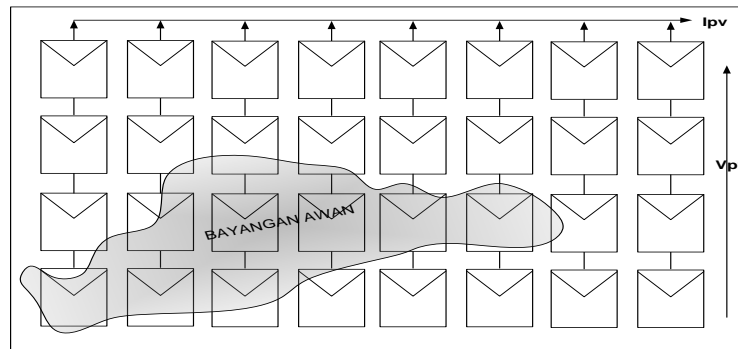
dengan rangkaian model string PV dan hanya untuk mentraking titik daya maksimum dari masing-masing string PV



Gambar 3. 6 Model sistem pv array

### c. Disain Model Photovoltaic berbayang sebagian tanpa.

Sebuah PV Array yang luas akan memiliki peluang besar untuk tertutup oleh bayangan awan sebagian areanya seperti diilustrasikan pada gambar Fenomena tertutupnya area dari PV farm ini disebut dengan Shadding. Akibat pengaruh Shadding yang mengenai sebagian area PV Farm ini, maka akan mengurangi daya total keluaran dari PV farm.

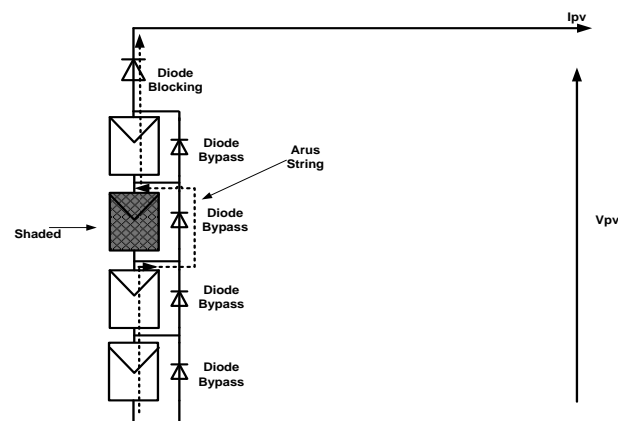


Gambar 3. 7 PVFarm yang Tertutup Bayangan Awan yang Melintas

Akibat pengaruh *shadding* yang mengenai sebagian modul PV array maka *reverse bias diode* akan menyimpan resistansi tinggi mengakibatkan penyerapan energi berupa panas, hal ini mengurangi besar arus ke beban. *Reverse bias diode* terjadi ketika salah satu dari modul PV tertutup bayangan. Dengan asumsi tegangan memiliki polaritas negatif pada level tinggi maka dioda kemungkinan akan

mengalami kerusakan akibat panas yang berlebih sehingga perlu dipasang *bypass diode* untuk mengamankan PV dari kerusakan

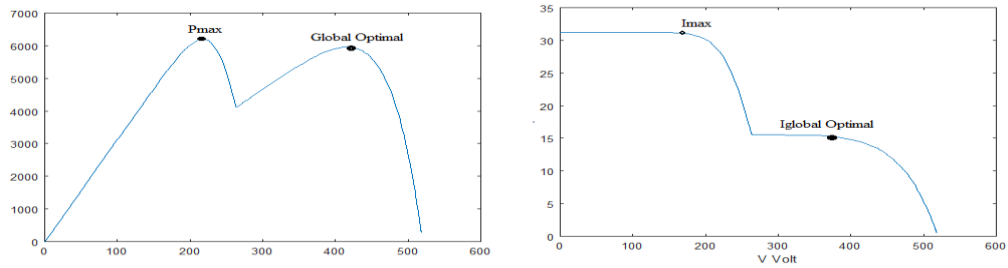
Pemasangan *Blocking diode* juga untuk memastikan bahwa arus akan selalu keluar dari string menuju kabel bus. Karena jika terjadi *shading*, tegangan pada string akan lebih rendah dibanding dengan string lain, sehingga string lain akan menganggap string yang terkena shading adalah beban yang menyebabkan kerusakan pada string yang terkena shading dikarenakan menerima arus berlebihan dan *reverse bias diode* yang memiliki resistansi tinggi akan mengonversi arus yang lewat menjadi panas berlebihan dan modul pada string tersebut bisa terbakar dan rusak.



Gambar 3. 8 Efek *Diode Bypass* pada Modul Shaded

Pada gambar 3.8 terlihat ilustrasi salah satu modul terkena bayangan sehingga arus akan cenderung melewati *bypass diode*. Arus mengalir melalui *bypass diode* dikarenakan *reverse bias diode* internal dari modul PV memiliki resistansi yang sangat besar. Dengan demikian maka tegangan modul yang terkena bayangan tidak akan terbaca, menyebabkan tegangan pada string akan berkurang.

Gambar 3.9 adalah kurva karakteristik PV *farm* yang tertutup bayangan sebagian. Dalam PV *farm* yang terdiri dari banyak string, jika terjadi fenomena *shaded* maka akan muncul beberapa level tegangan yang berbeda dalam PV *farm*. Dalam arti yang sama akan muncul beberapa titik puncak daya yang disebut *Maximum Power Point* (MPP). Banyaknya MPP dan besarnya MPP tergantung dari topologi PV *farm* dan seberapa besar efek *shading* terjadi.

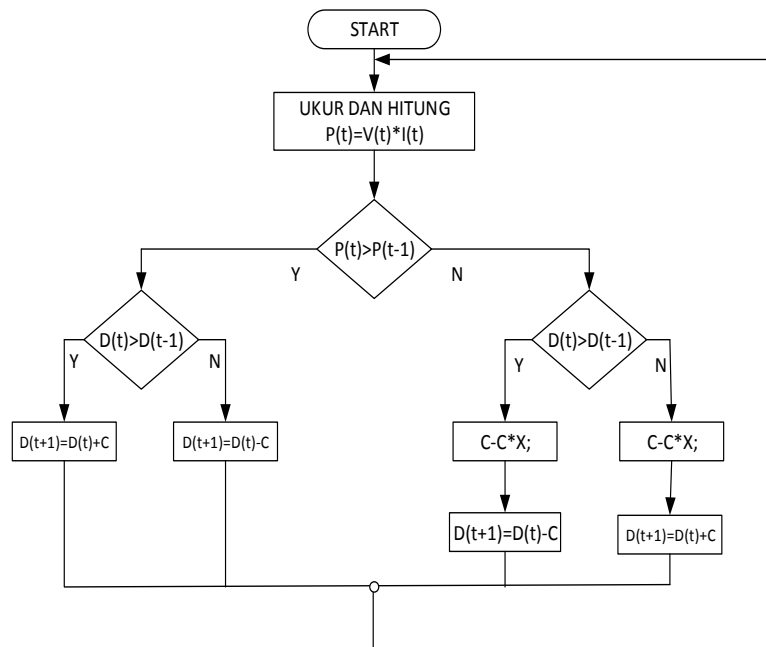


Gambar 3. 9 Kurva Karakteristik P-V dengan Beberapa Puncak Daya

### 3.3.2 Rangkaian MPPT dan Converter DC to DC

#### a. Peturb and Observe (PnO)

*Perturb and Observe (PnO)* adalah sebuah algoritma awal yang digunakan untuk aplikasi *Maximum Power Point Tracker photovoltaic*. Algoritma ini mempunyai respon yang cukup cepat dalam mencari titik puncak daya dari sebuah kurva karakteristik PV yang *uniform*, tapi PnO memiliki kelemahan *ripple duty cycle* ketika mencapai kondisi *steady state*. Kelemahan ini berimbas pada munculnya ripple pada daya keluaran konverter. adapun diagram alir dari algoritma ini adalah sebagai berikut



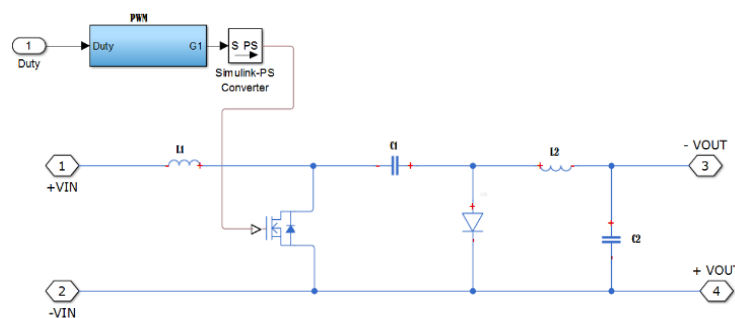
Gambar 3.10 Diagram Alir dari Algoritma PnO

Pada Gambar 3.10 merupakan sebuah *flowchart* prinsip dari algoritma *Modified* PnO untuk MPPT. Masukan dari algoritma *Modified* PnO adalah arus dan tegangan PV. Melalui nilai masukan tegangan  $V(t)$  dan arus  $I(t)$  diperoleh nilai daya  $P(t)$ . Pada saat daya PV dan tegangan naik, algoritma ini menaikkan nilai *duty cycle* ( $\Delta D$ ). Nilai *duty cycle* ( $D$ ) dijumlah dengan selisih nilai  $\Delta D$ , sehingga menghasilkan nilai titik operasi dan mencapai titik daya maximum, begitu juga dengan arah sebaliknya.

Pada *Modified* PnO, penambahan faktor  $C$  dikalikan dengan  $\Delta D$  untuk mengurangi step langkah *duty cycle* ketika algoritma MPPT berada disekitar titik MPP. pengurangan step *duty cycle* ini berimbas pada pengurangan ripple daya pada saat kondisi *steady state*. Pada m file dari mekanisme P n O yang digunakan untuk mencari tracking titik maximum power point dari kurva karakteristik system yang akan di optimalkan ada di lampiran.

#### b. Konverter Dc-dc TipeCuk

Konverter cuk merupakan regulator dc-dc yang mampu menghasilkan tegangan keluaran lebih besar atau kecil dari tegangan masukan. Tetapi tegangan keluaran dari konverter cuk bersifat inverting atau berlawanan arah dengan tegangan masukan. Konverter dc-dc tipe cuk terdiri dari dua induktor dan dua kapasitor, sebuah saklar (biasanya transistor atau Mosfet) dan sebuah dioda, secara skematis dapat dilihat pada Gambar 3.12 sebagai berikut



Gambar 3. 11 Konverter dc-dc tipe cuk

Nilai tegangan keluaran konverter cuk dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_o/V_s = D/1-D$$

Ketika dioperasikan sebagai *tracker* kurva P-V, besarnya nilai kapasitor yang digunakan harus memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$C_{1min} > \frac{D^2 T_s}{2R}$$

Pada rangkaian konverter cuk memiliki nilai tegangan *ripple* yang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\Delta V_{C_2} = \frac{DV_s}{8C_2 L_2 F^2}$$

Dengan mengasumsikan nilai  $\Delta Y$  pada rangkaian konverter cuk maka kita dapat memperoleh nilai kapasitor C2. Agar konverter cuk bekerja di modus CCM, maka nilai induktansi L1min dan L2 min rangkaian konverter cuk harus memenuhi persamaan sebagai berikut

$$L_{1min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2DF}$$

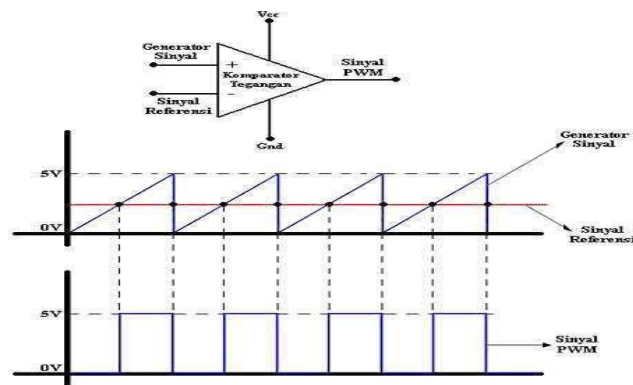
sedangkan nilai L2min adalah memenuhi syarat sebagai berikut:

$$L_{2min} = \frac{(1 - D)R}{2F}$$

Dengan D merupakan duty cycle minimum dari rangkaian konverter cuk, R resistansi beban dan f adalah frekuensi switching transistor.

### c. Rangkaian Kontrol Konverter DC- DC

Metode rangkaian kontrol konverter dc-dc ini lebih dikenal dengan istilah modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*). Dimana rangkaian ini membentuk besar pulsa dari *duty cycle system* yang digunakan. Hal tersebut dihasilkan dengan membangkitkan pulsa dengan periode tertentu sesuai desain yang diinginkan dalam pengendalian proses switching rangkaian konverter. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 12 Rangkaian kontrol konverter dc-dc

Siklus kerja ( duty cyle, D) didefinisikan sebagai perbandingan antara waktu saklar on terhadap perioda  $T_s$ . Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persentase. Secara matematis definisi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D = (T_{on}/T_s)100\%$$

Dimana :

D = Duty Cycle

$T_{on}$  = Lamanya Saklar on

$T_s$  = Periode Sinyal PWM

### 3.3.3 Disign Mekanisme Cluster String PV

Desain Algoritma Smart Clustering PV array mengacu pada hipotesis penelitian sebelumnya dan studi pustaka yang dikemukakan pada Bab 2 [3]. Pada referensi tersebut menjelaskan bahwa dengan menggunakan sistem klasifikasi pada PV Farm akan membuat daya yang bisa dihasilkan lebih besar.

Perbedaan utama sistem yang diusulkan dibandingkan dengan sistem MPPT yang sebelumnya adalah pada pendekatan pengelompokan nilai MPP-dari masing-masing string PV yang memiliki besar tegangan hasil MPPT yang bersesuaian. Gambar dibawah ini merupakan rangkaian simulasi yang dilakukan pada matlab. Dimana setiap keluaran MPPT yang terdapat pada masing-masing string dihubungkan langsung ke saklar dengan tiga opsi rate tegangan. Ketiga opsi tersebut adalah S1 untuk tegangan string Pv kecil dari 100 Volt, S2 adalah jika

tegangan string berada diantara atau sama dengan 100 Volt sampai 250 Volt, sedangkan S3 untuk tegangan string PV besar dari 250 Volt. Banyaknya saklar tergantung banyaknya string PV yang didesain dalam hal ini adalah sebanyak 4 pasang saklar. Proses on/off nya saklar yang digunakan dikendalikan menggunakan jaringan cerdas berbasis algoritma *Fuzzy inference system Takagi Sugeno*.

Diperlukan suatu aturan tertentu yang harus dipenuhi dalam mengambil keputusan control fuzzy yang digunakan pada penelitian ini. Adapaun sebagai variable masukan terdiri dari variable tegangan (Vout) dan perubahan tegangan (dVout). Besar input tegangan yang digunakan adalah bersumber dari tegangan keluaran Hasil mekanisme MPPT. Dimana besar input tersebut bervariasi dari 0 sampai dengan 500 Vdc. Sementara output dari mekanisme fuzzy logic control ini adalah berupa 3 buah sinyal control. Ketiga sinyal control berupa sinyal yang berfungsi untuk mengendalikan saklar dalam kondisi on/off.

Metode fuzzy yang digunakan adalah tipe Takagi Sugeno. Pada pengendali *Fuzzy logic* berlaku aturan-aturan tertentu yang menunjukkan proses pengendalian sistem. Secara umum aturan dituliskan sebagaimana persamaan berikut:

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } y \text{ is} \quad (2.3)$$

dengan  $\bullet$  adalah operator (misal OR atau AND),  $x_i$  adalah skalar dan  $A_i$  adalah variabel linguistik.

Pada penulisan tesis ini proses pengendalian system atau yang di kenal Rule dan rule viewer yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti yang diperlihatkan Pada Gambar 3.13 yang merupakan gambar Rule Editor dan Rule Viewer dari desain *fuzzy logic control* pada penelitian ini (FuzPV01.m)

Tabel 3.1 Prinsip Kerja fuzzy logic control

Vout	dvout	S1	S2	S3	Obs
V1	Low	1	0	0	1
	Medium	1	0	0	1
	High	0	1	0	1
V2	Low	0	1	0	1
	Medium	0	1	0	1
	High	0	0	1	1
V3	Low	0	0	1	1
	Medium	0	0	1	1
	High	0	0	1	1

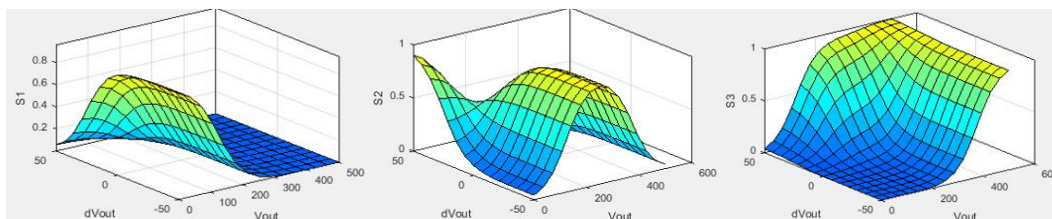


Pada Tabel 3.1 adalah merupakan tiga fungsi keanggotaan dari variabel input logika fuzzy dengan fungsi parameter dari  $v_{out}=dv_{out}$  pada saat  $V_1$  ,  $V_2$  dan  $V_3$  dalam kondisi low, medium dan high sehingga saklar menghidupkan (on/Of) pada masing-masing kondisi dengan rule base sebagai berikut:

- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_1$  dan  $dv_{out}$  adalah low maka  $S_1$  on  $S_2$  off dan  $S_3$  off.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_1$  dan  $dv_{out}$  adalah medium maka  $S_1$  on  $S_2$  off dan  $S_3$  off.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_1$  dan  $dv_{out}$  adalah high maka  $S_1$  off  $S_2$  on dan  $S_3$  off.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_2$  dan  $dv_{out}$  adalah low maka  $S_1$  off  $S_2$  on dan  $S_3$  off.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_2$  dan  $dv_{out}$  adalah medium maka  $S_1$  off  $S_2$  on dan  $S_3$  off.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_2$  dan  $dv_{out}$  adalah high maka  $S_1$  off  $S_2$  off dan  $S_3$  on.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_3$  dan  $dv_{out}$  adalah low maka  $S_1$  off  $S_2$  off dan  $S_3$  on.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_3$  dan  $dv_{out}$  adalah medium maka  $S_1$  off  $S_2$  off dan  $S_3$  on.
- Jika  $V_{out}$  adalah  $V_3$  dan  $dv_{out}$  adalah high maka  $S_1$  off  $S_2$  off dan  $S_3$  on.

Pada Gambar dibawah merupakan membership function dari desain yang digunakan. Dimana ke anggotaan yang digunakan pada penelian ini terdiri dari 3 buah fungsi yang merupakan keanggotaan dari variable input logika fuzzy, ketiga fungsi parameter dari variable input tersebut adalah  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $V_3$ .

Pada gambar dibawah merupakan surface dari suatu kurva hubungan antara masing-masing out put  $S_1$  ,  $S_2$  dan  $S_3$  dengan input tegangan ( $V_{in}$ )= $V_{out}$  MPPT dan delta tegangan ( $dV_{in}$ ). Dimana dengan mengamati gambar terlihat dinamika perubahan besaran yang terjadi pada setiap besaran input yang ditetapkan sebagai batasan. Dimana yang berwarna biru tua merupakan bukan anggota dari surface saklar yang digambar, sedangkan yang berwarna biru muda merupakan arsiran dari hubungan antara keanggotaan yang satu dengan yang lainnya. sementara yang berwarna kuning merupakan hanya anggota dari membership function surface tersebut.



Gambar 3. 13 Surface kurva output

## BAB 4

### ANALISA DAN PENGUJIAN DESAIN

#### 4.1 Pendahuluan

Pada penelitian ini pengujian dilakukan untuk setiap tahap desain yang dilakukan, meliputi desain model PV. string PV dan PV array baik dalam kondisi normal maupun dibawah pengaruh shading untuk berbagai variasi radiasi dan pola shading. demikian juga halnya untuk penggunaan rangkaian MPPT dan konverter DC to DC.

Dalam rangka pembuktian penggunaan metode cluster maka akan dilakukan dengan cara membandingkan daya yang dihasilkan oleh PV array dengan cara konvensional dan menggunakan cluster pada saat normal maupun dibawah pengaruh shading. Proses perbandingan dilakukan pada tahap sebelum dilakukan proses regulator tegangan dan setelah regulator. Hal tersebut dilakukan mengingat penggunaan rangkaian dc to dc converter pada proses regulasi akan dipengaruhi oleh besarnya efisiensi dari rangkaian regulator.

#### 4.2 Parameter Pengujian

Pada tahapan pengujian ini langkah-langkah adapun parameter yang digunakan antara lain parameter rangkaian Cuk Converter meliputi  $L1= 5e-1H$ ,  $L2=5e-1H$ ,  $C1= 20e-7F$ , dan  $C2=29e-7F$ , dan besar time sampling PWM ( $T_s = 1e-4$ ). Sementara besaran parameter modul PV telah dijabarkan pada bab 3.3. selain itu besar radiasi yang diberikan ke modul PV serta pola shading yang dijadikan eksperimen. Untuk besar dan pola radiasi diberikan dengan membentuk matriks dengan dimensi 4 x 12 seperti terlihat pada gambar.

$$G = \begin{bmatrix} 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \end{bmatrix};$$

Besar radiasi pada baris pertama kolom pertama merupakan besar radiasi yang diberikan pada model PV String pertama modul pertama. Atau dapat

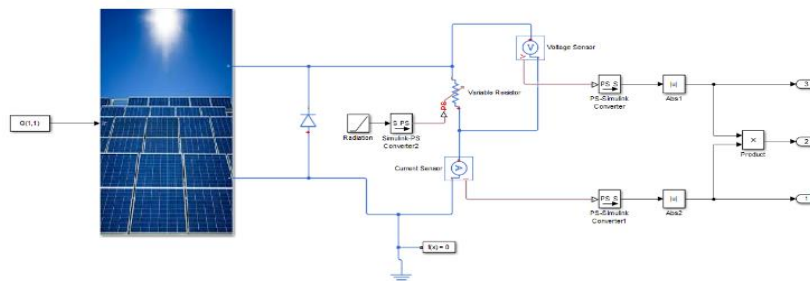
dirumuskan untuk radiasi  $G(3,5)$  itu adalah radiasi yang diberikan pada modul yang berada pada string ke tiga dengan urutan ke lima dari atas.

### 4.3 Pengujian Model PV Array

Tahapan pengujian model PV array dilakukan untuk mendapatkan kurva karakteristik Modul PV, String PV dan PV array. Kurva karakteristik tersebut meliputi kurva daya terhadap tegangan ( $P$  vs  $V$ ) dan Arus terhadap tegangan ( $I$  vs  $V$ ) dari besaran tegangan, arus dan daya dari model PV yang digunakan. Berdasarkan kurva karakteristik dari modul PV yang digunakan dapat ditentukan besarnya daya dari satu Modul PV, string PV maupun PV array diteliti dalam kondisi ideal maupun dipengaruhi efek shading.

#### 4.3.1 Pengujian $P$ , $V$ dan $I$ Modul PV

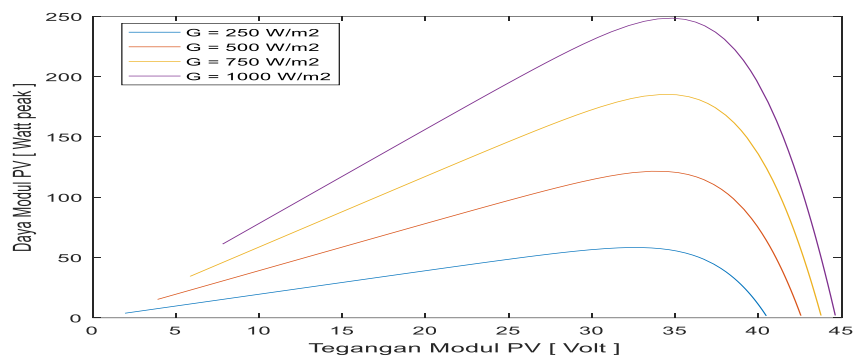
Pengujian modul PV dilakukan dengan menggunakan rangkaian simulasi seperti pada Gambar 4.1. rangkaian penguji karakteristik modul PV. Pada dasarnya proses pengujian ini dilakukan dengan memberikan besar radiasi  $G$  sebagai masukan dan mengatur resistor variable sebagai beban, lalu melakukan pengukuran besar arus dan tegangan untuk setiap saat pengambilan data. Sementara besaran daya diperoleh dengan mengalikan besar tegangan dan arus hasil pengambilan data. Lalu di plot dalam sumbu cartesian sesuai kebutuhan dalam hal ini  $P$  vs  $V$  dan  $I$  vs  $V$ . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Rangkaian penguji modul PV

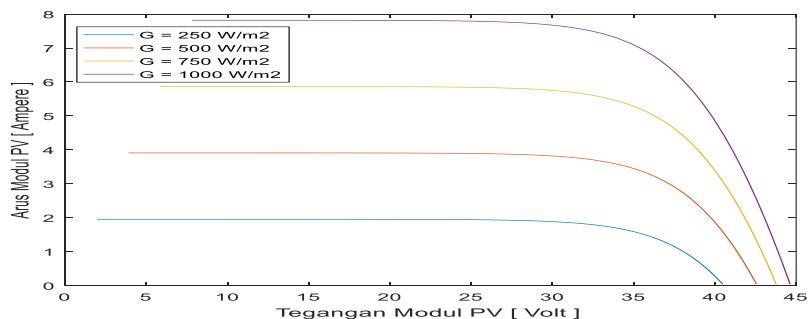
Berdasarkan hasil pengukuran pengujian dan pengukuran yang dilakukan

dengan besar radiasi berturut-turut  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$  seperti terlihat pada gambar 4.2. kurva karakteristik  $P$  vs  $V$  dari modul PV. Pada gambar terlihat daya maksimum untuk radiasi  $G=1000 \text{ W/m}^2$  adalah  $250 \text{ Wpeak}$  pada tegangan  $38 \text{ Volt}$ ,  $G = 750 \text{ W/m}^2$  sebesar  $180 \text{ Wpeak}$  pada tegangan  $36 \text{ Volt}$ ,  $G = 500 \text{ W/m}^2$  sebesar  $120 \text{ Wpeak}$  pada tegangan  $34 \text{ volt}$  dan untuk  $G=250 \text{ W/m}^2$  sebesar  $32 \text{ volt}$ . Hal ini memperlihatkan semakin besar radiasi yang diberikan maka semakin besar pula daya maximum yang dihasilkan. Namun besar tegangan untuk variasi radiasi relatif berbeda sedikit. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.2. dibawah ini.



Gambar 4. 2 Kurva karakteristik  $P$  vs  $V$  dari modul PV

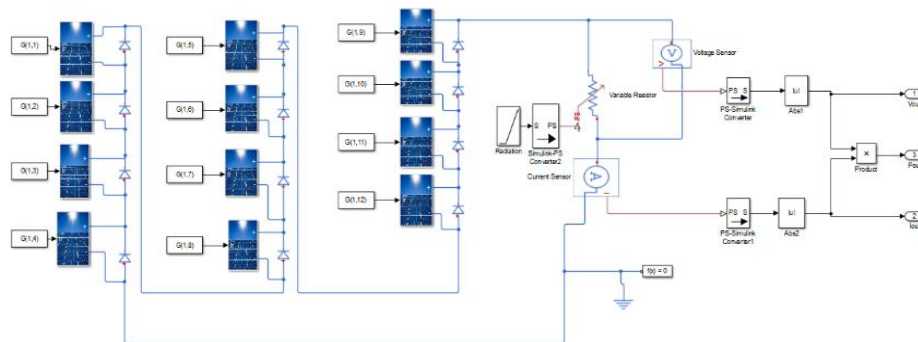
Karakteristik  $I$  vs  $V$  memperlihatkan bahwa semakin besar radiasi pada modul PV maka semakin besar pula arus PV ( $I_{pv}$ ) yang dihasilkan, namun besar tegangan ( $V_{pv}$ ) memiliki besar relatif sama untuk semua radiasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.3. yang merupakan Kurva karakteristik modul PV arus terhadap tegangan ( $I$  Vs  $V$ )



Gambar 4. 3 Kurva karakteristik modul PV arus

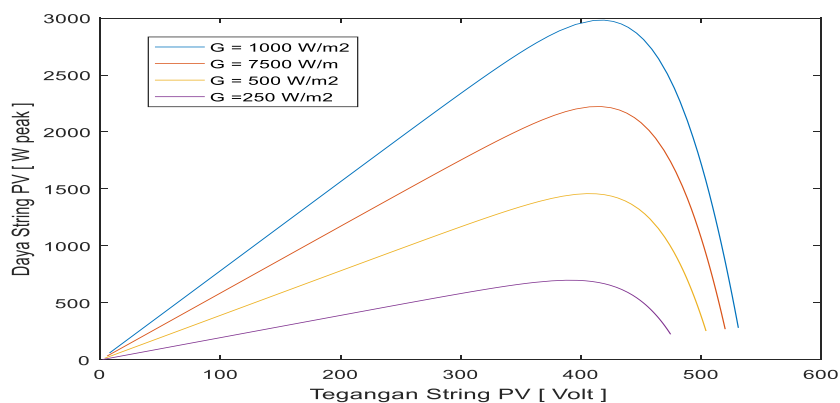
### 4.3.2 Pengujian P, V dan I string PV

Pengujian string PV dilakukan dengan menggunakan rangkaian simulasi seperti pada Gambar 4.4. yang merupakan rangkaian pengujian karakteristik String PV. Proses pengujian sama seperti pengujian modul PV. Namun pengujian string PV dilakukan untuk kondisi uniform maupun mendapat pengaruh efek tertutup bayangan.



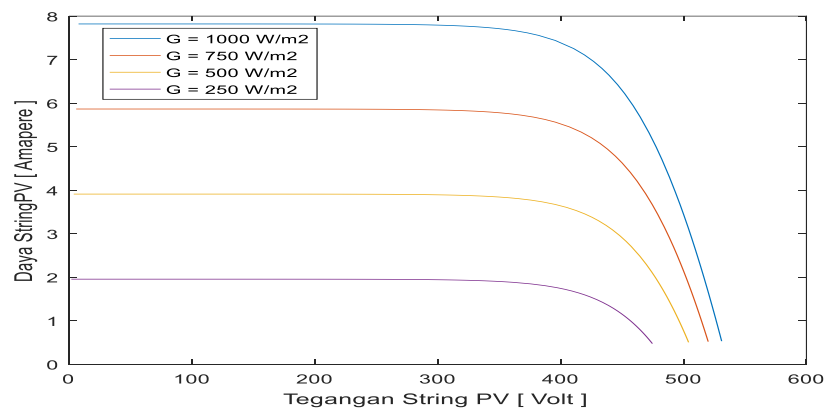
Gambar 4. 4 Rangkaian pengujian karakteristik String PV

Pada Gambar 4.5. yang merupakan kurva karakteristik string PV daya versus tegangan (P vs V) memperlihatkan variasi besarnya daya maksimum yang dihasilkan 12 buah modul PV yang tersusun secara seri yang diberikan variasi radiasi cahaya matahari dengan besar secara berturut turut 1000,750,500 dan 250 W/m<sup>2</sup> menghasilkan daya maksimum 3000,2200,1400 dan 600 Wattpeak. pada level tegangan dikisaran 410 s/d 430 volt.



Gambar 4. 5 Kurva karakteristik string PV daya versus tegangan

Gambar 4.6. yang merupakan kuva karakteristik string PV Arus terhadap tegangan (I vs V). Terlihat bawa pemberian variasi radiasi seperti pada kurva P vs V memperlihatkan perubahan variasi radiasi berbanding lurus dengan arus maksimum yang dihasilkan oleh string PV. Secara berturut-turut perubahan besar radiasi  $G = 1000, 750, 500$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$  menghasilkan arus sebesar 7.8, 5.9, 3.9, dan 1.95 A, dengan variasi tegangan maksimum diantara 410 sampai dengan 430 Volt.



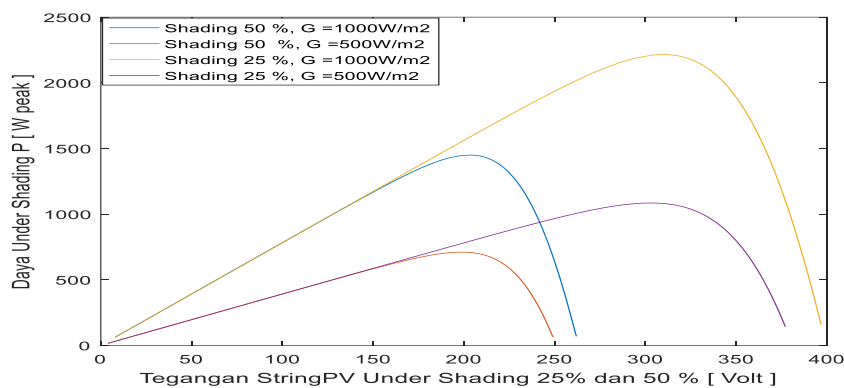
Gambar 4. 6 Kurva karakteristik string PV Arus terhadap tegangan

Pengujian selanjutnya adalah pengujian string PV mendapat pengaruh efek shading (tertutup bayangan, debu, daun-daunan, dll). Pada pengujian efek shading ini maka pada modul PV dalam satu string diberikan radiasi yang berbeda sehingga dioda by pass akan melakukan by pass modul-modul PV yang mendapat radiasi yang lebih dari yang lainnya. Hal ini bertujuan menghindari kerusakan modul PV akibat mendapat reverse bias.

Pengujian dilakukan untuk 2 buah level radiasi maksimum yaitu  $G=1000 \text{ W/m}^2$  dan  $G=500 \text{ W/m}^2$ . Selain itu pengujian juga dilakukan dengan memberikan level radiasi yang lebih kecil sebagai efek shading untuk masing-masing pengujian sebanyak 25% dan 50% modul pv terkena shading.

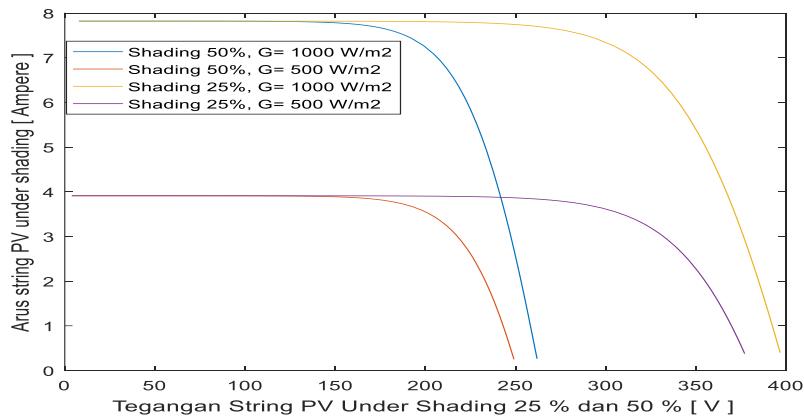
Hasil pengujian terlihat pada Gambar 4.7. yang merupakan kurva karakteristik String PV daya terhadap tegangan (P vs V) mendapat shading. Pada kasus  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  mendapat shading 25 % daya yang dihasilkan sebesar 2250 Wpeak. Hal ini ekivalen dengan  $(100\% - 25\%)$  dikalikan total daya yang dihasilkan

satu string yaitu 2250 W/m<sup>2</sup>. demikian juga halnya untuk shading 50 % sama dengan 50 % x 3000 W<sub>peak</sub> = 1500 W<sub>peak</sub>. Namun dalam pengujian memperlihatkan perbedaan tegangan untuk pengujian 25 % didapatkan tegangan pada daya maksimum sebesar 330 Volt (gambar warna kuning) dan untuk pengujian 50 % diperoleh tegangan pada daya maksimum sebesar 215 V (gambar warna biru). Demikian juga untuk hal yang sama pada pengujian pemberian radiasi maksimum G=500W/m<sup>2</sup> memiliki variasi yang relatif sama dengan pengujian G=1000. Nilai daya maksimum yang dihasilkan merupakan selisih daya maksimum dikurang daya maksimum yang terkena shading atau dengan kata lain daya yang tersisa akibat shading adalah Daya total tanpa shading - daya total yang terkena shading ( $P_{\text{sis}} = P_{\text{total}} - P_{\text{shading}}$ ).



Gambar 4. 7 Kurva karakteristik String PV daya terhadap tegangan

Pengujian kurva karakteristik arus terhadap tegangan (I vs V) mendapat shading seperti terlihat pada gambar 4.8. memperlihatkan bahwa efek shading tidak mempengaruhi besar arus yang terjadi pada string atau dengan kata lain efek arus disebabkan shading adalah nol. yang mengalami perubahan adalah besar tegangan. Dimana besar tegangan yang tersisa karena efek shading adalah sama dengan tegangan maksimum pada kondisi daya maksimum sama dengan Besar tegangan total saat daya maksimum - besar tegangan maksimum dari modul-modul yang mendapat shading ( $V_{\text{sis}} = V_{\text{stringmax}} - V_{\text{shadingmax}}$ ). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini. untuk Pengujian G=1000 W/m<sup>2</sup> berwarna kuning dan biru sementara untuk pengujian G=500W/m<sup>2</sup> berwarna merah dan ungu.

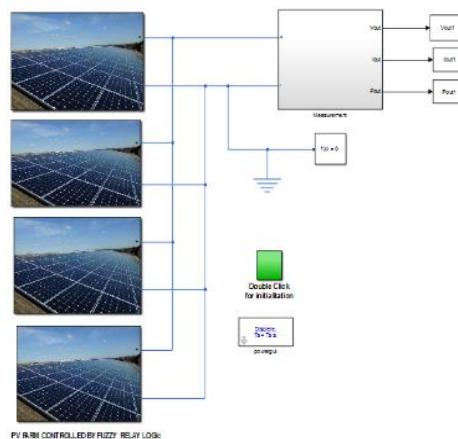


Gambar 4. 8 Pengujian kurva karakteristi arus terhadap tegangan

#### 4.3.3 Pengujian P, V dan I PV array

Pengujian kurva karakteristi PV array dilakukan relatif dengan cara yang sama dengan pengujian modul PV dan string PV. Namun yang membedakan pada pengujian ini adalah peletakan modul-modul yang mendapat shading dilakukan secara acak pada masing-masing string.

Pengujian dilakukan pada simulasi seperti terlihat pada Gambar 4.9. yang merupakan gambar desain simulasi untuk mendapatkan kurva karakteristik PV array.



Gambar 4. 9 Diagram simulasi PV array.

Pada pengujian dilakukan dengan memberikan shading secara berturut-turut sebanyak 6, 12 dan 24 modul mendapat shading secara acak. setiap perubahan



posisi modul yang mendapat shading akan mengakibatkan perubahan kurva karakteristik dari PV array. Namun untuk penyederhanaan dalam penganalisaan maka pada penelitian ini modul-modul yang terkena shading sebagai berikut:

1. Percobaan 1 tanpa shading (Uniform Case) berwarna Ungu
2. Percobaan 2 terkena shading 6 modul pada 1 string berwarna biru
3. Percobaan 3 terkena shading 12 modul pada 2 string berwarna merah
4. Percobaan 4 terkena shading 24 modul pada string 4 terkena 6 modul, string 3 senyak 8 modul dan string 1 sebanyak 8 modul yang mendapat shading.

Pada gambar 4.10. yang merupakan kurva karakteristik PV array daya terhadap tegangan (P vs V) memperlihatkan terdapat variasi titik puncak mengikuti pola shading yang diberikan.

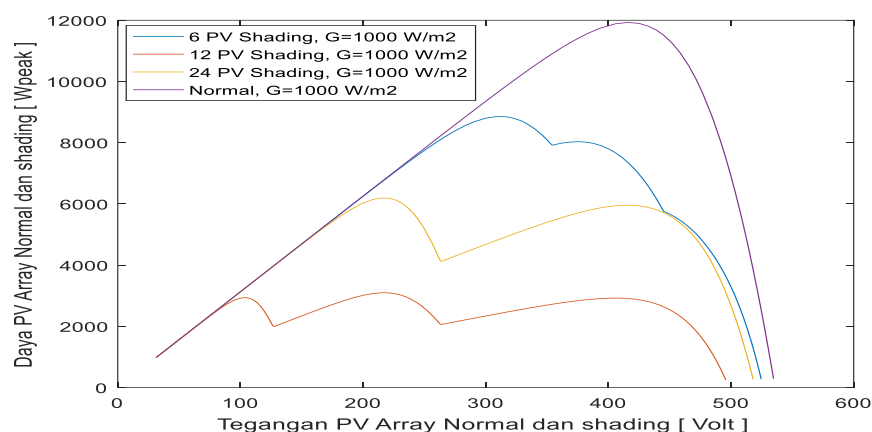
Pada percobaan 1 (satu) untuk kasus uniform maka terlihat terjadi satu titik  $P_{max} = 12000 \text{ Wpeak}$  pada saat tegangan 430 Volt; ini ekuivalen dengan total daya maksimum modul PV ( $P_{modul} = 250 \text{ Wpeak}$ ) dikalikan banyaknya modul yang digunakan pada PV array yaitu 48 modul. Dengan kata lain total daya yang dihasilkan adalah  $P_{maxmodul} \times \text{Banyaknya modul} = 250 \text{ Wp} \times 48 \text{ Modul} = 12000 \text{ Wp}$ .

Percobaan 2 (dua) untuk khusus shading 6 modul pada satu (1) string terkena shading terlihat terdapat 2 titik daya yaitu pada daya 9000 wp merupakan daya maksimum  $P_{max}=9000\text{Wp}$  dan pada  $P_{max}$  global = 8000 Wp. dengan level tegangan  $V_{pmax}= 430 \text{ volt}$  untuk  $P_{max}$  global dan tegangan  $V=300$  untuk  $P_{max}$  (Warna Ungu). Hal ini pada proses MPPT akan memilih daya maksimum sebagai keluaran dan  $P_{max}$  global akan di abaikan. Pada penelitian ini daya global yang diabaikan pada proses MPPT akan dimanfaatkan melalui mekanisme cluster berbasis tegangan string hasil MPPT yang dilakukan di setiap string PV

Percobaan 3 (tiga) untuk khusus shading 12 modul. Letak modul terkena shading adalah pada dua (2) string dengan masing masing string terdiri dari 6 modul terkena shading. Pada prinsipnya relatif sama seperti pada percobaan 2 dimana terdapat dua kelompok daya yaitu untuk kelompok yang mendapat shading masing-

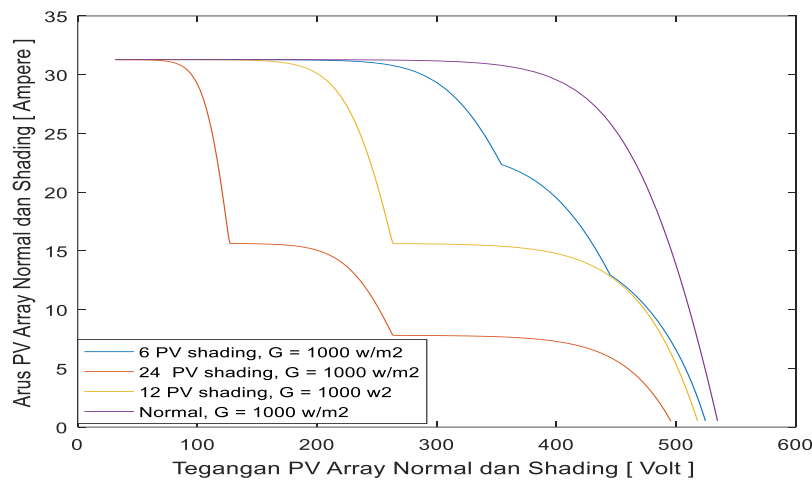
masing 6 modul dan kelompok yang tidak terkena shading. letak perbedaannya adalah pada besar tegangan, untuk yang tidak mendapat shading pada tegangan 430 dengan  $P_{max} = 580 \text{ Wp}$  dan tegangan 230 untuk yang mendapat shading pada  $P_{max} = 6000 \text{ Wp}$ . (gambar warna kuning). Pada proses MPPT akan memilih sebagai keluaran adalah titik dimana nilai  $P_{max}$  yang tertinggi.

Percobaan 4 merupakan suatu kasus dimana dari 4 string PV yang ada terdapat 3 variasi modul yang terkena shading, yaitu 2 string mendapat shading sebanyak masing-masing 8 modul dan satu string mendapat 6 modul dan satu string sisanya kondisi uniform (gambar berwarna merah). Kurva titik daya maksimum  $P_{max}$  yang dihasilkan secara berturut turut adalah 3000,2950 dan 2900 wpeak pada tegangan 110, 230 dan 430 volt. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 10 Kurva karakteristik PV array daya terhadap tegangan

Pada pengujian kurva karakteristik PV array Arus terhadap tegangan relatif memiliki penjelasan yang sama untuk masing-masing percobaan. yang secara umum dapat digambarkan seberapa banyak variasi string mendapat shading maka sebanyak itu pula variasi tegangan yang terjadi pada masing-masing kurva karakteristiknya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4. 11 untuk percobaan1(satu) berwarna ungu, percobaan 2 (dua) berwarna biru, percobaan 3(tiga) berwarna kuning dan percobaan 4(empat) berwarna merah.



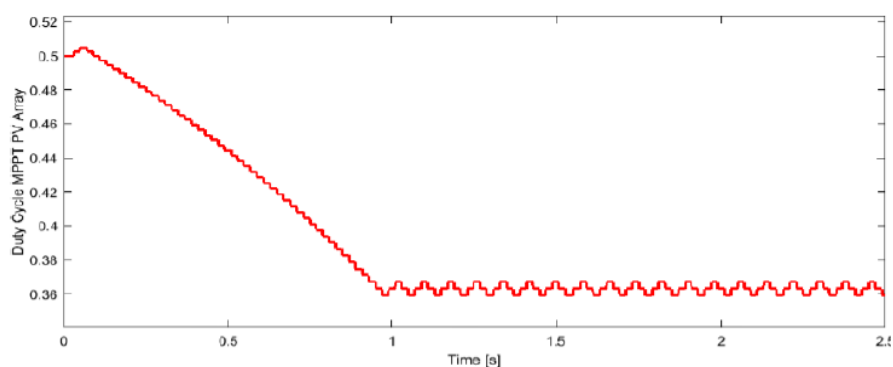
Gambar 4. 11 Kurva karakteristik PV array Arus terhadap tegangan

Untuk bisa menunjang penyelesaian sebuah penelitian, tentu sangat dibutuhkan pengaturan waktu yang jelas untuk masing-masing tahap yang akan dikerjakan. Pada bab ini akan dijelaskan secara detail tahap-tahap yang akan dilakukan, sekaligus jadwal pengerjaannya.

#### 4.4 Pengujian hasil MPPT berbasis P&O dan CUK Konverter

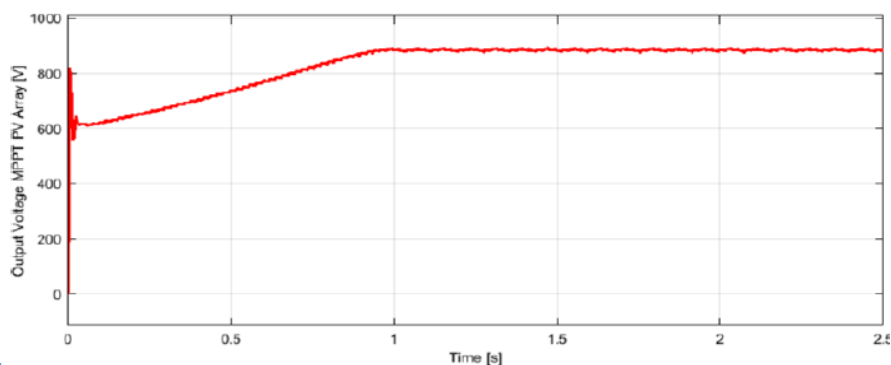
##### 4.4.1 Pengujian output Duty Cycle

Pada simulasi berbasis Matlab Powergui yang dilengkapi dengan instrumen ukur osiloscope. Pengujian keluaran Duty Cycle sesungguhnya setiap variasi percobaan memiliki variasi pergerakan duty cycle yang bervariasi sampai proses tracking titik daya maksimum didapatkan dengan pada Gambar 4.12 yang merupakan gambar keluaran duty cycle proses mencari titik daya maksimum untuk percobaan 4, dimana terlihat duty cycle bergerak dari 0.5 (50 %) naik sampai ke 0.52 dan turun secara bertahap mengikuti besar time sampling yang digunakan (0.0001 Second) sampai ke level 0.3 pada  $t_s = 1.45$  S. Pada titik tersebutlah diperoleh daya maksimum dari proses tracking MPPT.



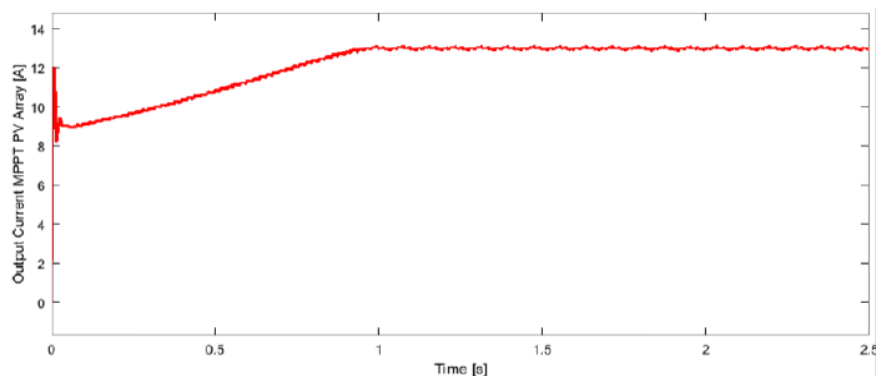
Gambar 4. 12 Keluaran duty cycle

Pengujian keluaran Duty Cycle sesungguhnya setiap variasi percobaan memiliki variasi pergerakan duty cycle yang bervariasi sampai proses tracking titik daya maksimum didapatkan dengan proses mencari titik daya maksimum untuk percobaan 4, dimana terlihat duty cycle bergerak dari 0.5 (50 %) naik sampai ke 0.52 dan turun secara bertahap mengikuti besar time sampling yang digunakan (0.0001 Second) sampai ke level 0.3 pada  $t_s = 1.45$  S. Pada titik tersebutlah diperoleh Besar tegangan keluaran MPPT PV Array



Gambar 4. 13 Besar Tegangan Keluaran MPPT PV Array

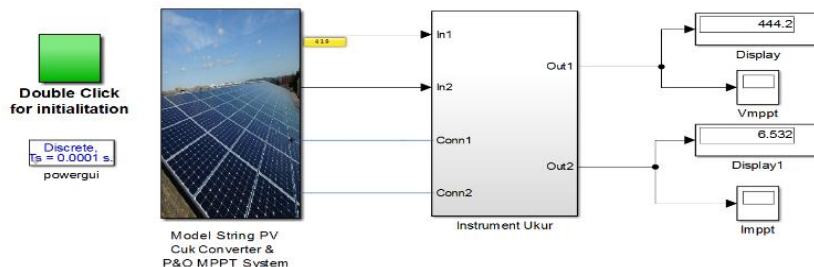
Pengujian keluaran Duty Cycle sesungguhnya setiap variasi percobaan memiliki variasi pergerakan duty cycle yang bervariasi sampai proses tracking titik daya maksimum didapatkan dengan proses mencari titik daya maksimum untuk percobaan 4, dimana terlihat duty cycle bergerak dari 0.5 (50 %) naik sampai ke 0.52 dan turun secara bertahap mengikuti besar time sampling yang digunakan (0.0001 Second) sampai ke level 0.3 pada  $t_s = 1.45$  S. Pada titik tersebutlah diperoleh Besar arus keluaran MPPT PV Array



Gambar 4. 14 Besar Arus keluaran MPPT PV Array

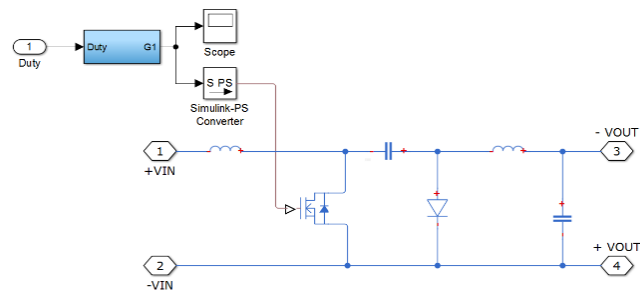
#### 4.4.2 Pengujian output Rangkaian MPPT

Pada tahapan pengujian keluran rangkaian MPPT dilakukan pengukuran daya keluaran berdasarkan pengukuran besar tegangan dan arus yang melalui beban Rload. Dimana besar Rload = 68 Ohm yang diperoleh berdasarkan kurva Karakteristik String PV untuk daya maksimum. Gambar dibawah ini merupakan desain simulasi dari keluaran MPPT.



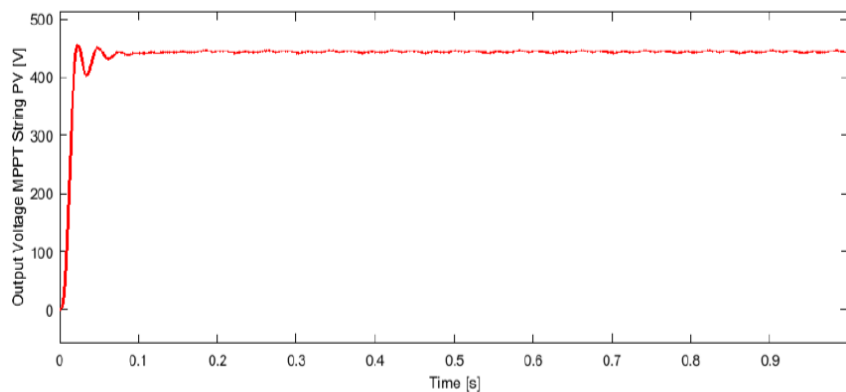
Gambar 4. 15 Desain simulasi keluaran MPPT

Gambar 4.15 merupakan desain simulasi keluaran MPPT dimana desain simulasi tersebut merupakan rangkaian keluaran dari tegangan dan arus DC to DC tipe CUK Converter. Rangkaian tersebut terdiri dari rangkaian elektronik yang tersusun dari dua kapasitor dan dua induktor dan dilengkapi mosfet sebagai switching. Untuk system kerja dan analisa rangkaian telah dibahas pada sebelumnya.

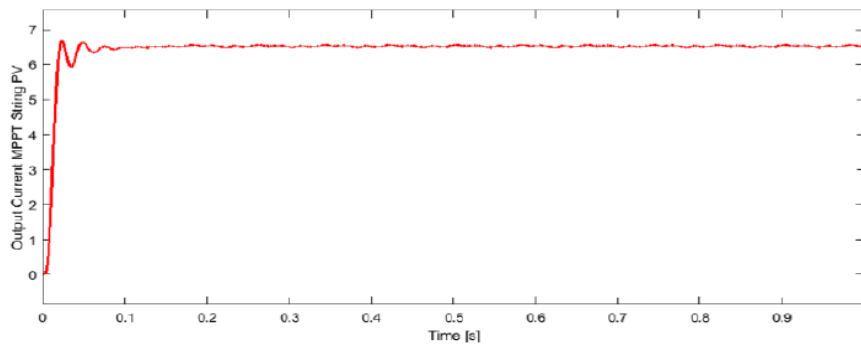


Gambar 4. 16 Rangkaian arus converter DC to Dc Type Cuk Converter

Pengujian pada percobaan 1 untuk kondisi seluruh modul PV pada string PV diberikan radiasi  $G = 1000$ , hasil pengujian memperlihatkan besar tegangan keluaran MPPT  $V_{mppt} = 444.2$  Volt dan besar arus keluaran MPPT  $I_{mppt} = 6.532$  A. dapat dilihat pada gambar 4.17ab. yang merupakan keluaran besar tegangan dan arus converter DC to DC type Cuk Converter. Berdasarkan pembacaan besar tegangan output MPPT  $V_{mmt}=444.2$  volt dan besar arus output MPPT  $I_{mppt} = 6.532$  pada pengujian menggunakan tahanan 68 Ohm. Sehingga besar daya keluaran string PV  $P_{max}= 2900.5411W_{peak}$  dengan efisiensi 96.711 %. Besar daya  $P_{max}$  tersebut diperoleh dengan melakukan perkalian tegangan arus ( $P_{max} = V_{mppt} \times I_{mppt} = 444.2 \times 6.532 = 2900.5411 W_{peak}$ ).



Gambar 4. 17a Besar tegangan keluaran MPPT String PV



Gambar 4. 17b. Besar arus keluaran MPPT String PV

Efisiensi rangkaian MPPT adalah besar daya keluaran MPPT  $P_{mppt}$  dibagi total daya maximum modul PV dikalikan jumlah modul yang terdapat pada satu string yang aktif atau efisiensi MPPT atau secara rumusan dapat dituliskan

$$\eta_{mppt} = (P_{mppt} / P_{stringPV}) \times 100\%$$

dimana

$$\eta_{mppt} = \text{Efisiensi MPPT}$$

$$P_{mppt} = \text{daya keluaran MPPT}$$

$$P_{stringpv} = \text{daya masukan MPPT}$$

Maka pada pengujian ini diperoleh efisiensi rangkaian MPPT adalah  $\eta_{mppt} = (2900,5411/3000) \times 100\% = 96.71\%$ .

Pengujian selanjutnya akan diperlihatkan pada tabel 4.1. yang merupakan tabel kondisi percobaan 1 dengan memberikan variasi radiasi  $G$  secara berturut-turut dari 1000, 750, 500, dan 250 W/m<sup>2</sup>, besar tegangan  $V_{mppt}$  sebesar 444.2, 314,9, 210.9 dan 105 V sedangkan besar arus keluaran  $I_{mppt}$  adalah 6.542, 4.631, 3.02, dan 1.667 A. Dari data tersebut memperlihatkan semakin kecil radiasi yang mengenai permukaan modul PV maka semakin kecil pula tegangan yang masuk ke rangkaian MPPT demikian juga halnya keluaran rangkaian MPPT.

Tabel 4.1. juga memperlihatkan besar daya input maupun output serta efisiensi terlihat secara berturut turut, dimulai dengan daya input untuk radiasi 1000, 750, 500 dan 250 W/m<sup>2</sup> adalah 3000, 2135, 1350 dan 600 W<sub>peak</sub> dan daya keluaran 2901.5144, 1458.3019, 636.918, dan 175.035 W<sub>peak</sub>. untuk tahanan tetap

Rload= 68 Ohm. Sementara efisiensi yang dihasilkan bervariasi dari 96.72, 68.30, 47.18, dan 29.17%. Dari tabel efisiensi memperlihatkan bahwa efisiensi rangkaian Cuk Converter akan menurun seiring menurunnya radiasi (input daya masukan) ke rangkaian MPPT. Hal itu disebabkan rangkaian MPPT didesain optimal pada kondisi daya string PV paling Optimal.

Pengujian selanjutnya akan diperlihatkan pada tabel dibawah;

Tabel 4. 1 Tabel kondisi percobaan 1

N0	Radiasi G	Vmppt	Imppt	Pmppt	Pin MPPT	% Efisiensi MPPT
1	1000	444.2	6.532	2901.5144	3000	96.72
2	750	314.9	4.631	1458.3019	2135	68.30
3	500	210.9	3.02	636.918	1350	47.18
4	250	105	1.667	175.035	600	29.17

Hasil pengujian penggunaan MPPT dan converter DC to DC type Cuk Converter untuk satu string PV pada khusus under shading dengan radiasi G=1000 W/m<sup>2</sup> terlihat pada Tabel 4.2. yang memperlihatkan besar tegangan, arus dan daya masuk dan daya keluaran yang menurun seiring banyak modul PV yang tertutup bayangan. Besar tegangan yang bervariasi dari string pada saat tertutup bayangan sebagian modul ini jika di paralelkan dengan string yang memiliki besar tegangan yang berbeda maka berpotensi beda potensial antara string dapat merusak modul-modul yang terdapat pada string dengan beda potensial yang lebih kecil apalagi bila berbedaannya relatif jauh. Selain itu mekanisme MPPT juga akan mengalami permasalahan untuk mendapatkan daya maksimum dikarenakan terdapat banyak titik-titik global optimal pada kurva karakteristiknya. Maka untuk mengatasi permasalahan tersebut peneliti mendesain suatu metode dalam rangka meningkatkan daya yang dihasilkan pada kasus tersebut melalui mekanisme cluster berbasis tegangan keluaran rangkaian MPPT. Perbandingan daya yang dihasilkan



dengan metode yang baru tersebut akan tergambarkan pada pengujian yang dibahas pada bab selanjutnya.

Tabel 4. 2 Besar tegangan, arus dan daya masuk dan daya keluaran

N0	G =1000	Vmppt	Imppt	P_MPPT	P_MPPT	%
	Modul under Shading			out	in	Efisiensi MPPT
1	1	423.1	6.222	2632.5282	2750	95.73
2	2	404.9	5.955	2411.1795	2500	96.45
3	3	383.4	5.638	2161.6092	2250	96.07
4	4	358.9	5.278	1894.2742	2000	94.71
5	5	338.8	4.888	1656.0544	1750	94.63
6	6	314.6	4.485	1410.981	1500	94.07
7	7	291.7	4.054	1182.5518	1250	94.60
8	8	245.6	3.776	927.3856	1000	92.74
9	9	214.6	3.196	685.8616	750	91.45
10	10	167.8	2.468	414.1304	500	82.83
11	11	110.5	1.722	190.281	250	76.11

#### 4.4.3 Pengujian PV Array menggunakan metode yang diusulkan

##### 4.4.3.1 Pengukuran Tegangan, Arus dan Daya

Pada pembahasan ini pengukuran dan pengujian dilakukan pada 4 percobaan yang memiliki pola shading yang berbeda-beda antara lain,

##### a. Percobaan 1

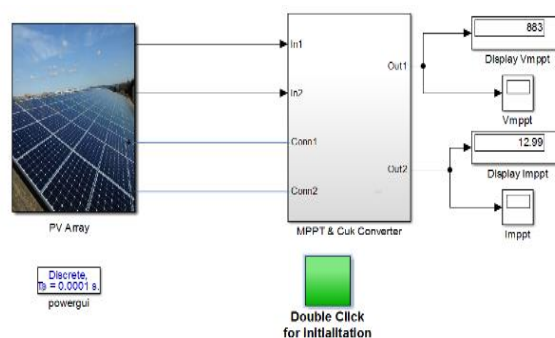
Percobaan dilakukan pada kondisi seluruh modul mendapat intensitas cahaya matahari (radiasi = [G]) uniform. Seperti terlihat pada matriks G dibawah ini. Baris pertama dari matriks G merupakan radiasi yang diberikan string pertama

pada PV array, baris ke dua merupakan radiasi yang diberikan pada string ke dua pada PV array, baris ke tiga adalah mewakili string ke 3 pada PV array dan baris ke 4 merupakan radiasi yang diberikan pada string ke 4 PV Array. Untuk mempersingkat pada penjelasan selanjutnya istilah baris digunakan sebagai string. Sementara kolom pada string merupakan urutan modul pada string dengan urutan 1 s/d 12.

```
G=[1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000];
```

Dari percobaan dengan menggunakan radiasi seperti pada matrik G, hasil pengujian tanpa menggunakan metode yang diusulkan didapatkan dapat dilihat pada gambar 4.19 yang memperlihatkan pada instrument ukur besar tegangan  $V_{PVarray}=883$  V, arus  $I_{pvarray}= 12.99$ A, sehingga daya yang dihasilkan adalah  $V * I = 883 * 12.99 = 11.470$  Wp. dengan  $\eta$  (efisiensi MPPT) =  $(11470.34/12000) * 100\% = 95.58\%$

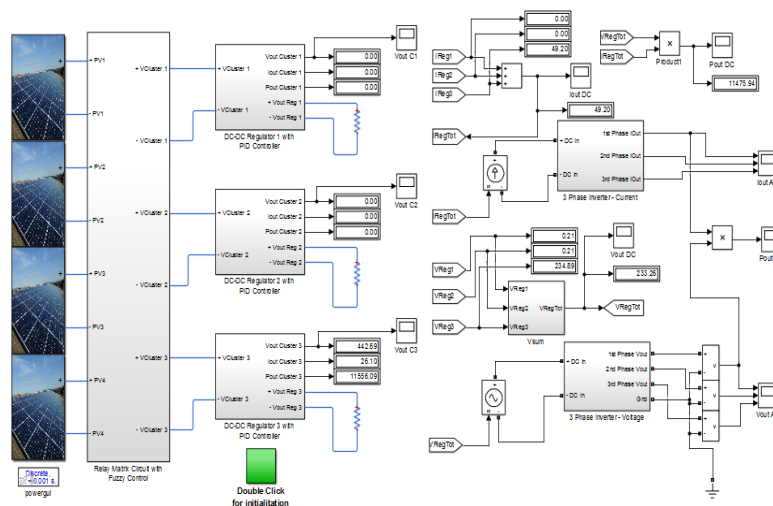
Besar tegangan, arus dan daya pada masing-masing cluster secara berturut-turut adalah  $V_{Cluster1} = 0$  Vdc,  $V_{cluster2} = 0$  Vdc, dan  $V_{cluster3} = 442.69$ .



Gambar 4. 18 Diagram simulasi yang diusulkan

Sementara arus  $I_{Cluster1} = 0$  A,  $I_{cluster2} = 0$  A, dan  $I_{cluster3} = 26.10$  A. Besar daya  $P_{Cluster1} = 0$  Wp,  $P_{cluster2} = 0$  Wp, dan  $P_{cluster3} = 11.554,209$ . Sementara pada keluaran Regulator memperlihatkan bahwa besar keluaran PV array pada percobaan 1 meliputi tegangan  $V_{pvarray} = 233.6$  Vdc, Arus  $I_{pvarray} = 49.20$  A, dan daya  $P_{pvarray}=$

11475,34 Wp. dengan total efisiensi MPPT dan regulator adalah  $\eta = (11475.34/12000) * 100\% = 95.63\%$ . Dari pengujian memperlihatkan pada kondisi tanpa shading besar daya yang dihasilkan tanpa cluster maupun menggunakan cluster relatif sama.



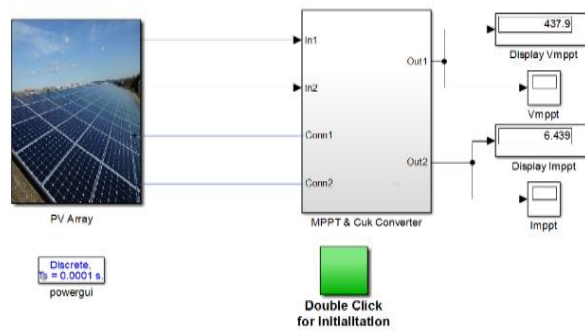
Gambar 4. 19 Diagram simulasi pengujian sistem

## b. Percobaan 2.

Pada Percobaan 2 pola shading yang diberikan seperti pada matrik G dibawah ini, pada string 1 terdapat 10 modul PV tertutup bayangan, pada string 2 terdapat 10 modul PV tertutup bayangan, string 3 terdapat 6 modul PV tertutup bayangan dan untuk string 4 tidak terdapat modul PV yang tertutup Bayangan.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \end{bmatrix};$$

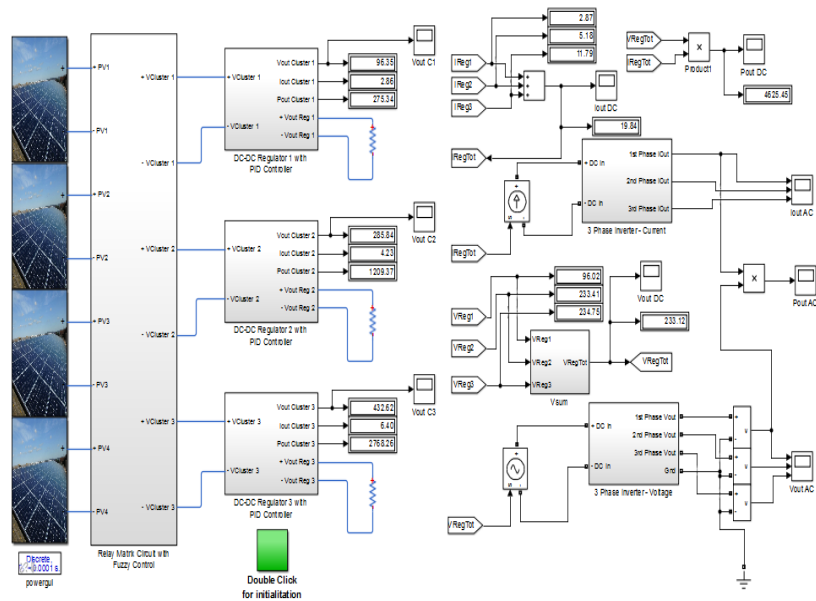
Berdasarkan gambar 4.17 pengujian menggunakan MPPT memperlihatkan besar tegangan  $V_{parray} = 437.9$ , Arus  $I_{parray} = 6.439$  dan daya sebesar  $P_{parray} = 437.9 * 6.439 = 2.819,64$  Wp. dengan  $\eta$  (efisiensi MPPT) = 93.99 %



Gambar 4. 20 Diagram simulasi menggunakan MPPT

Pengujian menggunakan metode cluster dihasilkan Besar tegangan, arus dan daya pada masing-masing cluster secara berturut-turut adalah  $V_{\text{Cluster1}} = 96.35$  Vdc,  $V_{\text{cluster2}} = 285.84$  Vdc, dan  $V_{\text{cluster3}} = 432.62$ . Sementara arus  $I_{\text{cluster1}} = 2.86$  A,  $I_{\text{cluster2}} = 4.23$  A, dan  $I_{\text{cluster3}} = 6.40$  A. Besar daya  $P_{\text{Cluster1}} = 275.34$  Wp,  $P_{\text{cluster2}} = 1209.37$  Wp, dan  $P_{\text{cluster3}} = 2768.24$  Wp

Sementara pada keluaran Regulator memperlihatkan besar keluaran PV array pada percobaan 2 meliputi tegangan  $V_{\text{pvarray}} = 233.12$  Vdc, Arus  $I_{\text{pvarray}} = 19.84$  A, dan daya  $P_{\text{pvarray}} = 4625.45$  Wp. dengan total efisiensi MPPT dan regulator. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.20 yang merupakan simulasi pengujian sistem menggunakan metode cluster.



Gambar 4. 21 Diagram pengujian sistem menggunakan metode cluster

### c. Percobaan 3 dan 4

Untuk selanjutnya pemaparan besar, tegangan, arus dan daya yang dihasilkan baik itu menggunakan cluster maupun tanpa menggunakan cluster untuk keseluruhan percobaan.

Pada percobaan 3 pola shading yang diberikan adalah, pada string 1 terdapat 6 modul PV tertutup bayangan, pada string 2 terdapat 6 modul PV tertutup bayangan, string 3 dan 4 tidak terdapat modul PV yang tertutup Bayangan. Sementara pada percobaan 4 pola shading yang diberikan adalah pada string 1 terdapat 4 modul PV tertutup bayangan, pada string 2 terdapat 2 modul PV tertutup bayangan, string 3 dan 4 tidak terdapat modul PV yang tertutup Bayangan.

Tabel 4. 3 Besar tegangan, arus dan daya dengan cluster dan tanpa cluster

Keterangan	Tanpa Cluster			Menggunakan Cluster				Regulator		
	Voltage (Volt)	Current (Ampere)	Power (Wpeak)	Cluster	Voltage (Volt)	Current (Ampere)	Power (Wpeak)	Voltage (Volt)	Current (Ampere)	Power (Wpeak)
Percobaan 1 S1,SD=0; S2,SD=0 S3,SD=0; S4,SD=0	883	12.99	11470.17	Cluster 1	0	0	0	233.6	49.2	11493.12
				Cluster 2	0	0	0			
				Cluster 3	442.69	26.1	11554.209			
Percobaan 2 S1,SD=10; S2,SD=10 S3,SD=6; S4,SD=0	437.9	6.439	2819.6381	Cluster 1	96.35	2.86	275.561	233.12	19.84	4625.1008
				Cluster 2	285.84	4.23	1209.1032			
				Cluster 3	432.62	6.4	2768.768			
Percobaan 3 S1,SD=6; S2,SD=6 S3,SD=6; S4,SD=0	509.1	7	3811.6317	Cluster 1	0	0	0	233.13	33.95	7914.7635
				Cluster 2	286	8.45	2416.7			
				Cluster 3	433.23	12.79	5541.0117			
Percobaan 1 S1,SD=4; S2,SD=2 S3,SD=6; S4,SD=0	607.2	8.93	5422.296	Cluster 1	0	0	0	233.42	42.65	9955.363
				Cluster 2	356.93	5.28	1884.5904			
				Cluster 3	433.36	18.74	8121.1664			

#### 4.4.3.2 Perhitungan Efisiensi.

Efisiensi yang dimaksud pada penelitian ini adalah besarnya persentasi perbandingan output input. Dimana yang dimaksud dengan input adalah besarnya total daya yang dihasilkan modul. Sementara yang dimaksudkan dengan out put adalah total daya yang dihasilkan pada tiap tahapan peralatan. atau secara matematis dapat dirumuskan efisiensi daya adalah sebagai berikut;

$$\Pi = \frac{P_{in}}{P_{out}} (100\%)$$

Dimana:

$\Pi$  = efisiensi

$P_{in}$  = Total daya yang dapat dihasilkan modul tanpa shading

$P_{out}$  = Total daya yang dihasilkan pada masing-masing blok peralatan

Pada tabel berikut ini memperlihatkan besaran daya maupun efisiensi dari masing-masing peralatan seperti terlihat pada tabel.

Tabel 4. 4 Besaran daya maupun efisiensi dari masing-masing peralatan

Keterangan	Daya Total				Efisiensi Pada Tahap Metode		
	Daya (Wpeak)	Referensi Tanpa Cluster (Wpeak)	Metode Usulan Cluster (Wpeak)	Regulator (Wpeak)	Reff %	Usulan %	Regulator %
Percobaan 1 S1,SD=0;S2,SD=0; S3,SD=0;S4,SD=0	12000	11470.17	11554.209	11493.12	0.96	0.96	0.96
Percobaan 2 S1,SD=10;S2,SD=10; S3,SD=6;S4,SD=0	5500	2819.6381	4253.432	4625.1008	0.51	0.77	0.84
Percobaan 3 S1,SD=0;S2,SD=0; S3,SD=0;S4,SD=0	9000	3811.6317	7957.7117	7914.7635	0.42	0.88	0.88
Percobaan 1 S1,SD=0;S2,SD=0; S3,SD=0;S4,SD=0	10500	5422.296	10000.576	9954.71	0.52	0.95	0.95

#### 4.4.3.3 Porsentasi Peningkatan Daya Metode yang diusulkan

Persentasi peningkatan daya metode yang diusulkan adalah besar persentase selisih daya yang dihasilkan dengan menggunakan metode yang diusulkan (Metode cluster dengan meode konvensional (tanpa cluster) dibagi dengan daya tanpa cluster dikalikan 100%. Atau secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\% \text{ peningkatan} = (x - y / y) * 100\%$$

Dimana; x=daya cluster, y=daya tanpa cluster.

Dari tabel 4.5 yang merupakan tabel peningkatan daya memperlihatkan bahwa pada kasus uniform (Percobaan1) terlihat besar meningkatkan daya relatif sama. Hal berarti pada kasus tanpa shading design system yang diusulkan dapat bekerja dengan baik. Sementara pada khusus under shading terlihat terjadi peningkatan daya yang signifikan, bahkan dapat mencapai 108 % dibandingkan metode lama. Dari penjelasan tersebut bahwa Metode yang dihasilkan dapat digunakan sebagai metode Alternatif dalam rangka peningkatan daya pada suatu

pembangkit PV khususnya pada khusus tertutup awan sebagian (Shading). Namun juga dapat bekerja dengan baik pada kasus tanpa shading.

Tabel 4. 5 Porsentasi peningkatan daya

Keterangan	Daya Tanpa Cluster	Daya Dengan Cluster	Selisih Daya	% Peningkatan Daya
Percobaan 1	11470.17	11554.209	84.039	0.732674407
Percobaan 2	2819.6381	4253.432	1433.7939	50.8502811
Percobaan 3	3811.6317	7950.712	4139.0803	108.5907723
Percobaan 4	5422.296	10096.25	4673.954	86.19879844

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melaksanakan perancangan dan simulasi sistem photovoltaic menggunakan MPPT dan menggabungkan metode pensaklaran clustering dengan regulator PID didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada Percobaan 1, 2, 3 dan 4 yang dilakukan secara berturut-untuk tanpa cluster adalah, 11470.17, 2819.6381, 3811.6317, dan 5422.296 Wpeak, Sementara dengan menggunakan cluster dihasilkan daya 11554.209, 4253.432, 7950.712, dan 10096.25. Hal ini mmemperlihatkan metode yang diusulkan dapat bekerja dengan baik untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh pembangkit PV Array.
2. Pada percobaan yang dilakukan dengan metode yang diusulkan (Metode Cluster) secara berturut-turut besarnya persentase dan peningkatan daya untuk percobaan 1, 2, 3 dan 4 adalah sebesar 84.39Wp (0.73%), 1433.7939Wp (50.85%), 4139,0803Wp (108,59%), dan 4673,954Wp (86,19%)
3. Berdasarkan percobaan 1, 2, 3 dan 4 secara berturut-turut keluaran daya regulator dan efisiensi regulator adalah 11493.12 (96%), 4625.1008 (84%), 7914.7635 (88%), dan 9955.363 (95%).
4. Berdasarkan pengujian Pembangkit PV array menggunakan metode cluster untuk kasus tertutup bayanyangan sebagian, terjadi peningkatan daya yang sangat signifikan bahkan sampai dengan 100%, jika dibandingkan pembangkit PV Array dengan menggunakan metode konvensional (tanpa cluster). Namun hal tersebut dapat bervariasi mengikuti dinamika bayangan yang menutupi modul-modul PV yang terdapat pada pembangkit PV array.
5. Berdasarkan percobaan yang dilakukan memperlihatkan Metode yang diusulkan (*Metode Cluster Berbasis Fuzzy Logic Controller*) dapat bekerja dengan baik melakukan cluster berdasarkan tegangan string PV dapat bekerja dengan baik.



6. Demikian juga halnya dengan desain regulator PID juga dapat bekerja dengan baik untuk melakukan meregulasi tegangan pada level 233 Volt dc
7. Maka dengan hasil yang diperoleh tersebut memperlihatkan metode yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai metode Alternatif dalam rangka peningkatan daya pada suatu pembangkit PV Array, kondisi normal maupun tertutup awan sebagian (*Shading effect*).

## **5.2 Saran**

Berdasarkan permasalahan, tujuan serta pelaksanaan penelitian ini maka penulis menyarankan beberapa saran sebagai berikut,

1. Membuat suatu protipe pembangkit PV array berdasarkan metode yang diusulkan.
2. Penggunaan MPPT berdasarkan range kerja tegangan masing-masing cluster.
3. Mendesain metode ini dengan menggunakan metode-motode controller lainnya, dalam rangka mempercepat proses clustering dan peningkatan daya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdul Jaleel, J., Nazar, A. & Omega, A.R., 2012. Simulation on Maximum Power Point Tracking of the Photovoltaic Module using LabVIEW. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 1(3), pp.190–199.
- [2]. Ahmadi, D., Mansouri, S.A. & Wang, J., 2011. Circuit topology study for distributed MPPT in very large scale PV power plants. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 1(d), pp.786–791.
- [3]. Algazar, M.M. et al., 2012. Maximum power point tracking using fuzzy logic control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 39(1), Antonius, R., Ashari, M. & Irawan, D.C., 2014. Maximum power point control for standalone photovoltaic system using fuzzy sliding mode control. In *The 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering*. Semarang, Indonesia: IEEE Explore.
- [4]. Yang, M.-S., Hwang, P.-Y. & Chen, D.-H., 2004. Fuzzy clustering algorithms for mixed feature variabls. *fuzzy sets and systems*, 141, pp. 301-317.
- [5]. Åström, K.J. & Hägglund, T., 2004. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 14(6), pp.635–650.
- [6]. Bendib, B. et al., 2014. Advanced fuzzy MPPT controller for a stand-alone PV system. In *Energy Procedia*. pp. 383–392.
- [7]. Cordón, O. et al., 2004. Ten years of genetic fuzzy systems: current framework and new trends. *Fuzzy Sets and Systems*, 141(1), pp.5–31. Dadone, P., 2001.
- [8]. *Design Optimization of Fuzzy Logic Systems*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [9]. Durgadevi, A. & Arulselvi, S., 2012. (Beng Tito,2012). (Atar Fuady, 2012) ANFIS Modeling, Partial Shading and MPPT Controlled Hardware Analysis of Standing Alone Photovoltaic Water Pumping System. *International Journal of Computer Science Issues (IJSCI)*, 9(4 (3)), pp.480–486.
- [10]. Edrington, C.S., Balathandayuthapani, S. & Cao, J., 2010. Analysis and control of a multi-string photovoltaic (PV) system interfaced with a utility grid. In *IEEE PES General Meeting, PES 2010*.
- [11]. Eshram, T. & Chapman, P.L., 2007. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Techniques. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 22(2), pp.439–449.
- [12]. Forcan, M., Durišić, Ž. & Mikulović, J., 2016. An algorithm for elimination of partial shading effect based on a Theory of Reference PV String. *Solar Energy*, 132, pp.51–63.
- [13]. Hyung, K. et al., 2014. Efficiency control of multi-string PV system considering switching losses analysis. In *Conference Proceedings - IEEE*

- Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*. pp. 3143–3149.
- [14]. Kandiban, R. & Arulmozhiyal, R., 2012. Speed Control of BLDC Motor Using Adaptive Fuzzy PID Controller. *Procedia Engineering*, 38, pp.306–313.
- [15]. Knospe, C., 2006. PID control. *Control Systems, IEEE*, 26(1), pp.216–251.  
Li, Q. & Chai, T., 1999. Fuzzy adaptive control for a class of non linear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 101(1), pp.31–39.[18]. Li, S., 2014. A MPPT control strategy with variable weather parameter and no DC/DC converter for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 108, pp.117–125
- [16]. Linares, L. et al., 2009. Improved energy capture in series string photovoltaics via smart distributed power electronics. In *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*. pp. 904–910.
- [17]. M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E.R.F., 2009. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *Revista Eletrônica de Potência, Brazilian Journal of Power Electronics*, 14(1), pp.35–45.
- [18]. Mamdani, E.H., 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), p.1585.
- [19]. Marisarla, C. & Kumar, K.R., 2013. A Hybrid Wind and Solar Energy System with Battery Energy Storage for An Isolated System. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 3(3), pp.99–104.
- [20]. Mastromauro, R.A., Liserre, M. & Dell'Aquila, A., 2012. Control issues in single-stage photovoltaic systems: MPPT, current and voltage control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(2), pp.241–254.
- [21]. Mitra, L. & Swain, N., 2014. Closed Loop Control of Solar Powered Boost Converter with PID Controller. In *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. pp. 1–5.
- [22]. Ogata, K., 2010. *Modern Control Engineering*,
- [23]. Oveisi, A. & Nestorovic, T., 2016. Robust observer-based adaptive fuzzy sliding mode controller. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76–77,

pp.58–71.

- [24]. Patel, H. & Agarwal, V., 2008. MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. *IEEE Trans. Energy conversion*, 23(1), pp.302–310.
- [25]. Seyedmahmoudian, M. et al., 2013. Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. *Energies*, 6(1), pp.128–144.
- [26]. Sharma, P. & Agarwal, V., 2014. Maximum power extraction from a partially shaded PV array using shunt-series compensation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(4), pp.1128–1137.
- [27]. Shen, J.-C., 2002. New tuning method for PID controller. *ISA Transactions*, 41(4), pp.473–484.
- [28]. Shi, Y. & Mizumoto, M., 2000. A new approach of neuro-fuzzy learning algorithm for tuning fuzzy rules. *Fuzzy Sets and Systems*, 112(1), pp.99–116.
- [29]. Takagi, T. & Sugeno, M., 1985. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15(1), pp.116–132.
- [30]. Tang, K.S. et al., 2001. An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4), pp.757–765.
- [31]. Triwiyatno, A. et al., 2011. A New Method of Robust Fuzzy Control : Case Study of Engine Torque Control of Spark Ignition Engine. *International Journal of Academic Research*, 3(5), pp.178–185.
- [32]. Wahid, N. & Hassan, N., 2012. Self-Tuning Fuzzy PID Controller Design for Aircraft Pitch Control. In *2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation*. pp. 19–24.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN A

```
% mppt PnO%

function D = PO(V,I,T)

persistent P2 P1 dP d dd n;

if isempty(V)
    V=20;
end

if isempty(I)
    I=0;
end

if isempty(P2)
    P2=0;
end

if isempty(P1)
    P1=0;
end

if isempty(dP)
    dP=0;
end

if isempty(d)
    d=1;
end

if isempty(dd)
    dd=0;
end

if isempty(n)
    n=1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if (T > n*0.02) %chu ki lay mau 0.02s
        n = n + 1;
        P1=P2;
```

```

P2=V*I;
dP=P2-P1;
if (dd==0)
    if dP>1
        dd=0.01;
        d=d+dd;
    else
        if dP<-1
            dd=-0.01;
            d=d+dd;
        else
            dd=0;
        end
    end
end
else
    if ((dP<1) && (dP>-1))
        dd=0;
        d=d+dd;
    else
        if ((dP/dd)>0)
            dd=0.01;
            d=d+dd;
        else
            dd=-0.01;
            d=d+dd;
        end
    end
end
end
end
D=d/(d+1);
if D<0.1
    D=0.1;

```

```
        d=D/(1-D);  
    else  
        if D>0.9  
            D=0.9;  
            d=D/(1-D);  
        else  
            end  
        end  
    end  
end
```



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **LAMPIRAN B**

### **SINTAG FUZZY**

```
[System]
Name='FuzPV01'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=3
NumRules=9
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='Vout'
Range= [0 500]
NumMFs=3
MF1='V1': 'gaussmf', [100 0]
MF2='V2': 'gaussmf', [100 250]
MF3='V3': 'gaussmf', [100 500]

[Input2]
Name='dVout'
Range= [-50 50]
NumMFs=3
MF1='Low': 'gaussmf', [21.24 -50]
MF2='Med': 'gaussmf', [21.24 0]
MF3='High': 'gaussmf', [21.24 50]

[Output1]
Name='S1'
Range= [0 1]
NumMFs=2
```

```

MF1='Off': 'constant', [0]
MF2='On': 'constant', [1]

[Output2]
Name='S2'
Range= [0 1]
NumMFs=2
MF1='Off': 'constant', [0]
MF2='On': 'constant', [1]

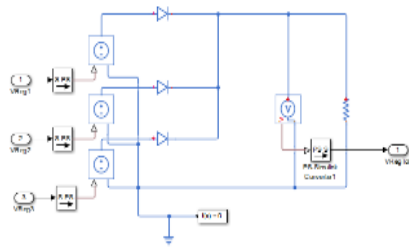
[Output3]
Name='S3'
Range= [0 1]
NumMFs=2
MF1='Off': 'constant', [0]
MF2='On': 'constant', [1]

[Rules]
1 1, 2 1 1 (1): 1
1 2, 2 1 1 (1): 1
1 3, 1 2 1 (1): 1
2 1, 1 2 1 (1): 1
2 2, 1 2 1 (1): 1
2 3, 1 1 2 (1): 1
3 1, 1 1 2 (1): 1
3 2, 1 1 2 (1): 1
3 3, 1 1 2 (1): 1
G = [ 0 0 0 0 0 0 1000 1000 1000 1000 1000 1000
      0 0 0 0 0 0 1000 1000 1000 1000 1000 1000
      0 0 0 0 0 0 1000 1000 1000 1000 1000 1000
      0 0 0 0 0 0 1000 1000 1000 1000 1000 1000];

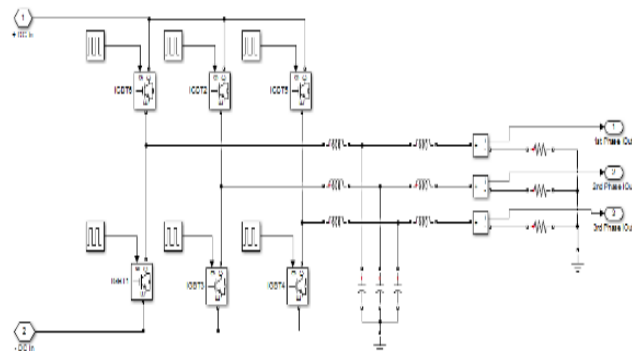
```



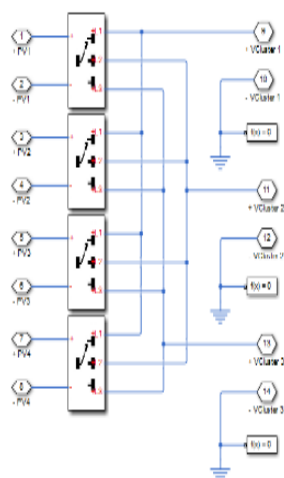
#### 4. V sum



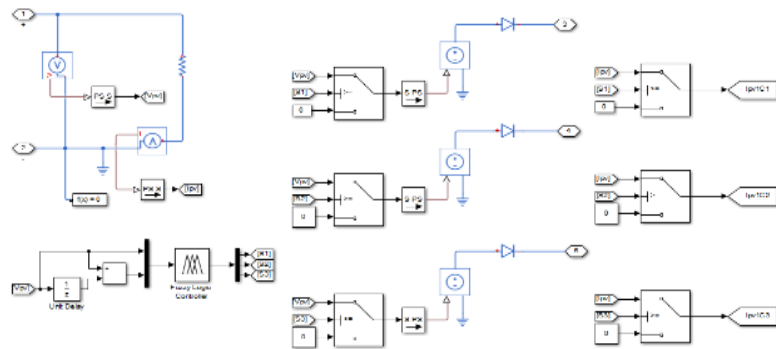
#### 5. 3 phase inverter-current



#### 6. Relay matrix circuit with fuzzy control



## 7. 3 switch system 1



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## TENTANG PENULIS



Basilio Mendonça Freitas, lahir di Baguia pada hari Selasa, tanggal 2 Januari 1973. Menyelesaikan Pendidikan Sekolah Dasar Katholik di SDK Santo Yosep Baguia kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SLTP Katholik Santo Yosep Baguia. Selepas selesai pendidikan Sekolah Menengah Pertama lantas penulis berhijrah untuk menuntut pendidikan Sekolah Teknik Menengah di STM DON BOSCO FATUMAKA. Selepas STM penulis lanjutkan ke perguruan tinggi Politeknik Negeri Dili di bidang elektro dan Politeknik Negeri Malang (POLINEMA) di bidang elektro

penulis lanjutkan ke Universitas Dian Nuswantoro Semarang di bidang teknik Industri lulus pada tahun 2007. Semenjak Sekolah Dasar, Menengah dan Kuliah penulis senang untuk berkontribusi mengikuti Pelatihan bidang-bidang seperti berikut; Latihan Dasar Militer, Pelatihan Sistem Pendingin di Politeknik Negeri Bandung. Pelatihan bidang otomasi dan mekatronika di Balai Besar Latihan Kerja Surakarta (BBLK Surakarta). Pelatihan bidang jaringan distribusi tegangan tinggi dan rendah SENAI São Paulo Brasil, Pelatihan di bidang sistem produksi komponen cctv photoelectric dan relay sensor di perusahaan Pial Legrand São Paulo Brasil. Pelatihan di bidang sistem Refrigerasi SENAI São Paulo Brasil. Pelatihan bidang lapisan atmosfer (ozon), Selanggor Alam syah Malaysia. Pelatihan Management balai latihan kerja, di OIT turim Italia, Pelatihan di bidang alternative Thecnologi Phovoltaic Melborn Australia. Pelatihan Competance Base Tranning (CBT) di CFP Tibar Oleh Asian Development Bank (ADB). Mengikuti pelatihan di bidang kurikulum tranning center di SENAI Becora oleh tecnichal dari Senai São Paulo Brasil. Semenjak 2001 sampai 2013 menjadi koordinator sekaligus sebagai instructor dan 2014 sampai 2015 menadi Direktor Centro Nacional Formacao Profisional SENAI Becora Dili Timor Leste kerja sama dengan Agencia Brasileira Coopecão (ABC) Timor Leste no Servico Nacional Aprendigagem Industrial (SENAI) Saó Paulo Brasil dan menjadi staf pengajar di bidang Teknik Tenaga Listrik, Elektronika Dasar di Universidade da Paz Timor Lester dari tahun 2008-2015. masih banyak kegiatan-kegiatan extra yang penulis tidak camtumkan di buku ini.

Semoga ITS menjadi panduan bagi penulis agar tetap semangat dan lebih semangat lagi untuk menempuh bidang-bidang yang lain.

Penulis